

ЛЕСОВЕДЕНИЕ, ЛЕСОВОДСТВО, ЛЕСНЫЕ КУЛЬТУРЫ, АГРОЛЕСОМЕЛИОРАЦИЯ, ОЗЕЛЕНЕНИЕ,
ЛЕСНАЯ ПИРОЛОГИЯ И ТАКСАЦИЯ / FORESTRY, FORESTRY, FOREST CROPS, AGROFORESTRY,
LANDSCAPING, FOREST PYROLOGY AND TAXATION

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.46.13>

ТЕПЛОТВОРНАЯ СПОСОБНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ ЕЛИ, ПОРАЖЕННОЙ ГНИЛЯМИ

Научная статья

Васькин С.А.^{1,*}, Коптев С.В.², Третьяков С.В.³, Гольшев В.А.⁴, Холопова Н.С.⁵

¹ ORCID : 0000-0001-6160-5140;

² ORCID : 0000-0002-5402-1953;

³ ORCID : 0000-0001-5982-3114;

^{1,5} Филиал ФБУ «Рослесозащита» - «Центр защиты леса Архангельской области», Архангельск, Российская Федерация

^{2,3,4} Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (serzh.vaskin.2015[at]mail.ru)

Аннотация

Ельники северо-таежного района отличаются наличием высокой доли деревьев, пораженных гнилями разных стадий развития. Часть древесины в соответствии со стандартом на круглые лесоматериалы может быть использована как дровяная. Для рационального и полного использования древесины, пораженной гнилями разных стадий развития необходимы исследования о ее теплотворной способности. В статье приведены результаты изучения теплотворной способности древесины ели, пораженной гнилями разной степени декомпозиции и разных типов гниения.

Цель работы – установление теплотворной способности древесины ели, пораженной дереворазрушающими грибами в зависимости от стадии и типа гнили. Теплотворную способность древесины ели, пораженной гнилью, устанавливали при помощи автоматизированного бомбового калориметра АБК-1В. У образцов с деструктивной гнилью теплотворная способность выше теплотворности здоровой древесины и варьирует в пределах в среднем от 20467,7 до 22411,6 Дж/г. У образцов с коррозионной гнилью теплотворная способность имеет тенденцию к снижению по сравнению с теплотворностью здоровой древесины и варьирует в пределах от 18579,7 до 20169,2 Дж/г. В зависимости от типа и стадии гнили теплотворная способность пораженной древесины ели значительно варьирует. Установленные параметры теплотворной способности древесины ели, пораженной гнилью, могут использоваться как качественные характеристики древесной массы для использования в качестве биотоплива.

Ключевые слова: теплотворная способность, дереворазрушающие грибы, деструктивная гниль, коррозионная гниль.

CALORIFIC CAPACITY OF SPRUCE WOOD AFFECTED BY ROTS

Research article

Vaskin S.A.^{1,*}, Koptev S.V.², Tretyakov S.V.³, Golishev V.A.⁴, Kholopova N.S.⁵

¹ ORCID : 0000-0001-6160-5140;

² ORCID : 0000-0002-5402-1953;

³ ORCID : 0000-0001-5982-3114;

^{1,5} FBI"RCFH"- "Centre of Forest Health of the Arkhangelsk region", Arkhangelsk, Russian Federation

^{2,3,4} the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation

* Corresponding author (serzh.vaskin.2015[at]mail.ru)

Abstract

Spruce forests of the Northern taiga region are characterized by a high proportion of trees affected by rots of different stages of development. Some of the wood can be used as firewood in accordance with the standard for roundwood. For rational and complete utilization of wood affected by rot of different stages of development, it is necessary to study its calorific capacity. The article presents the results of studying the calorific value of spruce wood affected by rots of different decomposition stages and different types of decay.

The aim of the work was to determine the calorific capacity of spruce wood affected by wood-destroying fungi, depending on the stage and type of rot. The calorific capacity of spruce wood affected by rot was determined using an automated bomb calorimeter АБК-1V. The calorific value of samples with destructive rot is higher than that of healthy wood and varies from 20467.7 to 22411.6 J/g on average. In samples with corrosive rot, the calorific value tends to be lower than that of healthy wood and ranges from 18579.7 to 20169.2 J/g. Depending on the type and stage of rot, the calorific capacity of affected spruce wood varies significantly. The established parameters of calorific value of spruce wood affected by rot can be used as qualitative characteristics of wood pulp for use as biofuel.

Keywords: calorific capacity, wood-destroying fungi, destructive rot, corrosive rot.

Введение

Леса имеют первостепенное значение для накопления биомассы и доступности в качестве источника энергии. Использование биомассы в качестве экологически чистого возобновляемого источника энергии вызывает значительный интерес, о чем свидетельствует тот факт, что на использование биомассы приходится примерно 10-14% мирового потребления энергии [8, С. 111], [9, С. 1334], [14, С. 2]. Биомасса обладает преимуществом перед

ископаемым топливом. Топливо из биомассы содержит незначительную концентрацию серы, образует меньше золы и выделяет гораздо меньше выбросов в атмосферу по сравнению с ископаемым топливом [9, С. 1335]. Это приводит к тому, что ее все чаще используют в различных энергетических технологиях, которые находятся в постоянном развитии [12, С. 2]. Для рационального использования древесины необходимы исследования ее физических и химических свойств, а также теплотворной способности.

Дереворазрушающие грибы вызывают разложение древесины, изменяя ее химический состав, влияют на выход целлюлозы и структурно-морфологические свойства волокон целлюлозы [18, С. 11], [5, С. 270]. Данные изменения влияют и на теплотворную способность древесины ели, пораженной гнилью. В северотаежных ельниках Архангельской области дереворазрушающие грибы представлены различными видами. Причиной пестрой коррозийной гнили являются дереворазрушающие грибы: корневая губка (*Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref) и еловая губка (*Phellinus chrysoloma*). Деструктивную трещиноватую гниль вызывают трутовик Швейнитца (*Phaeolus schweinitzii*) и окаймленный трутовик (*Fomitopsis pinicola* (Sw.: Fr.)). Для всех видов дереворазрушающих грибов характерно преобладание средней степени декомпозиции древесины. Встречаемость корневой губки в 1 и 2 стадиях развития составила 27%, еловой губки – 48%, трутовика Швейнитца – 23% [4, С. 24].

Учитывая невозможность возобновления ресурсов ископаемого топлива, сокращение площади лесов и ухудшение их состояния, важно проводить исследования, для определения теплотворной способности древесины и факторы, влияющие на данный показатель. Изучение этого вопроса будет способствовать более эффективному использованию низкоуглеродной древесины в качестве сырья в процессах термической или химической переработки.

Методы и принципы исследования

Образцы древесины ели, пораженной гнилью разных видов и стадий декомпозиции, получены в ходе полевых исследований в северо-таежном лесном районе Архангельской области европейской части России.

Цель работы – выявление теплотворной способности древесины ели пораженной дереворазрушающими грибами в зависимости от стадии и типа гнили. С повышением влажности теплотворная способность материала значительно уменьшается [17, С. 297], поэтому ее определяли в абсолютно сухом состоянии. Древесину ели пораженной гнилью высушивали в сушильном шкафу при температуре 105 °С в бумажных конвертах. После извлечения из сушильного шкафа горячие конверты помещали в эксикатор с хлористым кальцием. После этого теплотворную способность образцов древесины устанавливали при помощи автоматизированного бомбового калориметра АБК-1В. Образцы массой 1,0...1,2 г сжигали в виде спрессованных таблеток в жаропрочных тиглях из нержавеющей стали. В качестве запала использовали медную проволоку диаметром 0,5 мм.

Основные результаты

В среднем хвойные породы обладают более высокой теплотой сгорания по сравнению с лиственными [16, С. 710]. Это связано с большим содержанием лигнина и экстрактивных (в первую очередь смолистых) веществ [15, С. 16]. Качественный состав этих веществ приблизительно постоянный [7, С. 149]. По нашим данным установлено, что теплотворность здоровой древесины ели без коры, составляет 20067,9 Дж/г. Полученные данные близки к справочным значениям и данным других исследователей [1, С. 53], [13, С. 6].

В зависимости от влияния дереворазрушающих грибов различают три основные стадии разложения древесины: начальную – которая характеризуется появлением цветных пятен и полос, при этом первоначальную структуру и прочность древесины сохраняет; развитую – которая характеризуется появлением видимых нарушений в структуре древесины еще сохраняет определенную твердость, хотя ее плотность и механические свойства уже сильно снижены; конечную – характеризующуюся появлением мягкости и хрупкости, при полной потере нормальной прочности [2, С. 80].

По структуре и особенностям разрушения клеточных стенок выделяют деструктивный и коррозионный тип гниения древесины. У образцов с деструктивным типом гниения происходит разложение целлюлозы, уменьшается объем древесины, она становится хрупкой, в ней появляются трещины. При коррозионном типе гниения происходит делигнификация древесины. Разложению подвергаются отдельные участки пораженной древесины. Объем древесины при этом типе разрушения практически не уменьшается, но резко снижается ее плотность, она сохраняет определенную пластичность и может расщепляться на волокна [6, С. 240]. Встречается и смешанный тип гниения – коррозионно-деструктивный, когда ферментативный аппарат грибов в равной мере направлен на разрушение и углеводов, и лигнинных комплексов [3, С. 91]. У образцов древесины с разными видами гнили, будет изменяться и их теплотворная способность. Значения теплотворности древесины ели пораженной деструктивной гнилью различных стадий приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Теплотворная способность древесины ели пораженной гнилью деструктивного типа различных стадий

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.46.13.1>

Тип гнили	Стадия гнили	Теплотворность, Дж/г				Зольность, %			
		Q1	Q2	Q3	Q ср	A1	A2	A3	Аср
Здоровая	0	19866,81	20361,68	19975,42	20067,97	0,00	0,00	0,00	0,00
Деструктивная	1	20583,90	20293,20	20526,13	20467,74	0,00	0,00	0,00	0,00

Деструктивная	1	20804,64	20423,09	20292,89	20506,87	0,00	0,00	0,00	0,00
Деструктивная	2	21012,36	21051,28	20674,66	20912,77	0,00	0,00	0,00	0,00
Деструктивная	2	21012,01	20980,41	21117,94	21036,79	0,00	0,00	0,00	0,00
Деструктивная	2	21377,36	21539,91	21298,33	21405,20	0,00	0,00	0,00	0,00
Деструктивная	2	22109,06	21830,35	21952,15	21963,85	0,42	0,10	0,09	0,20
Деструктивная	3	21921,30	22661,49	21875,24	22152,68	0,00	0,00	0,00	0,00
Деструктивная	3	22549,00	21879,00	22261,55	22229,85	0,00	0,00	0,00	0,00
Деструктивная	3	22113,10	22402,11	22713,53	22409,58	0,26	0,10	0,11	0,15
Деструктивная	3	22390,45	22611,41	22233,08	22411,65	0,43	0,36	0,26	0,35

Изменение теплоемкости древесины пораженной деструктивной гнилью в зависимости от стадии гнили представлено на рисунке 1.

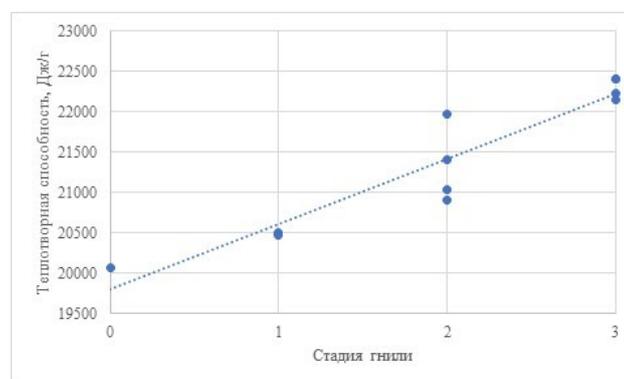


Рисунок 1 - Изменение теплоемкости древесины ели с деструктивной гнилью в зависимости от стадии гнили
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.46.13.2>

Авторами выявлено, что теплотворная способность образцов древесины ели, пораженной деструктивной гнилью всех стадий выше, чем теплотворная способность образца здоровой древесины ели без коры. Корреляционный анализ позволил зафиксировать высокую связь теплоемкости образцов древесины ели пораженной деструктивной гнилью с повышением стадии гнили (коэффициент корреляции равен 0,93). С повышением стадии декомпозиции деструктивной гнили увеличивается и ее теплотворная способность. В целом воздействие деструктивной гнили вызвало увеличение теплотворной способности древесины ели в среднем на 2343,68 Дж/г. При этом в 1 стадии выше на 419,3 Дж/г, во 2 стадии – на 1261,6 Дж/г, в 3 стадии – на 2232,9 Дж/г. В третьей стадии теплоемкость образцов деструктивной гнили достигает 22411,6 Дж/г. Более высокие значения теплотворной способности у образцов древесины ели с деструктивной гнилью, по сравнению со здоровой древесиной, отмечены и в других исследованиях [13, С. 6].

Содержание золы при сжигании образцов с деструктивной гнилью было низким и составляет в среднем от 0,15% до 0,35% по массе, во 2 и 3 стадии гнили. По данным различных исследователей этот показатель варьирует от 0,32% по массе до 0,73% по массе в древесине ели. При этом зольность выше в лесных остатках до 1,79 % по массе [19, С. 7], [11, С. 5].

Значения теплоемкости древесины ели пораженной коррозийной гнилью различных стадий приведены в таблице 2.

Таблица 2 - Теплотворная способность древесины ели, пораженной гнилью коррозийного типа различных стадий

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.46.13.3>

Тип гнили	Стадия гнили	Теплоемкость [Дж/г]				Зольность, %			
		Q1	Q2	Q3	Q ср	A1	A2	A3	Аср
Здоровая	0	19866,81	20361,68	19975,42	20067,97	0,00	0,00	0,00	0,00
Коррозийная	1	20001,79	20345,58	19645,90	19997,76	0,00	0,00	0,00	0,00
Коррозийная	1	19872,62	19771,74	19573,72	19739,36	0,00	0,00	0,00	0,00
Коррозийная	2	18066,47	17855,30	19817,62	18579,80	0,00	0,00	0,00	0,00
Коррозийная	2	18738,36	18742,17	18740,57	18740,37	0,00	0,00	0,00	0,00
Коррозийная	2	18721,80	18725,55	18734,12	18727,16	0,00	0,00	0,00	0,00
Коррозийная	3	19775,90	19275,53	19133,10	19394,84	0,54	0,47	0,69	0,57
Коррозийная	3	20722,36	20520,94	19264,35	20169,22	0,43	0,50	1,75	0,89
Коррозийная	3	20081,98	20023,18	19753,57	19952,91	0,00	0,00	0,00	0,00
Коррозийная	3	19565,85	19341,19	19180,09	19362,38	1,43	1,25	1,02	1,24
Коррозийная	3	20389,77	19972,67	19373,82	19912,09	0,53	1,15	0,63	0,77

Изменение теплоемкости древесины пораженной коррозийной гнилью в зависимости от стадии гнили представлено на рисунке 2.

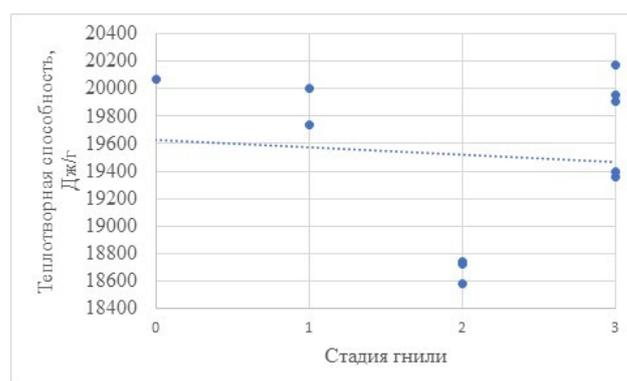


Рисунок 2 - Изменение теплоемкости древесины ели с коррозийной гнилью в зависимости от стадии гнили

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.46.13.4>

По нашим данным установлено, что теплотворная способность образцов древесины ели, пораженной коррозийной гнилью ниже, чем теплотворная способность образца здоровой древесины ели без коры. При этом для образцов древесины в 1 стадии декомпозиции теплотворная способность ниже на 199,4 Дж/г, во 2 стадии – на 1385,53 Дж/г, в 3 стадии – на 309,68 Дж/г. Корреляционный анализ не выявил достоверной связи между стадией коррозийной гнили и ее теплотворной способностью (коэффициент корреляции равен 0,24). Снижение теплотворной способности образцов с коррозийной гнилью может быть связано с тем, что при этом типе гниения разрушается лигнин. Такая же тенденция для древесины ели, пораженной коррозийной гнилью, отмечена и в других исследованиях [13, С. 7].

Содержание золы при сжигании образцов с коррозийной гнилью было средним и составляет от 0,57% до 1,24% по массе, в 3 стадии гниения.

Связь теплотворной способности древесины ели, пораженной различными типами гнилей, со стадиями декомпозиции гнили представлена в таблице 3.

Таблица 3 - Связь теплотворной способности образцов различных типов гнилей со стадией разложения

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2024.46.13.5>

Тип гнили	Уравнение связи	Коэффициент детерминации
Деструктивная	$y = 809,3 + 19796x$	0,88
Коррозионная	$y = -54,5x + 19627$	0,06

В результате исследования установлена высокая связь между теплотворной способностью и стадией декомпозиции пораженной древесины для деструктивного типа гнили. Для образцов с коррозионным типом гниения выявлена слабая связь между теплотворной способностью и стадией гнили.

Теплотворной способностью для различных частей хвойных пород находится в диапазоне в среднем от 18,500 до 20,500 Дж/г [1, С. 53], [10, С. 9]. По нашим данным, теплотворная способность образцов с деструктивным типом гнили начиная со второй стадии превышает представленные показатели. При этом теплотворная способность образцов с коррозионным типом гнили всех стадий разложения варьирует в пределах указанного диапазона.

Заключение

В проведенном исследовании установили, что тип и стадия гнили имеют значительное влияние на теплотворную способность древесины. Теплотворная способность образцов с деструктивной гнилью варьирует в пределах в среднем от 20467,74 до 22411,65 Дж/г. При этом во всех стадиях декомпозиции деструктивной гнили теплотворная способность образцов выше, чем у здоровой древесины. У образцов с коррозионной гнилью в целом происходит снижение теплотворной способности. При этом во второй стадии коррозионной гнили зафиксировано снижение теплотворности образцов до 18579,8 Дж/г. В зависимости от типа и стадии гнили теплотворная способность древесины ели значительно варьирует.

Выявили, что увеличение теплотворной способности древесины ели пораженной гнилью деструктивного типа, по сравнению со здоровой древесиной, имеет высокую корреляционную зависимость с повышением стадии гнили. В то же время теплотворность древесины ели пораженной гнилью коррозионного типа имеет слабую корреляционную зависимость от стадии гнили. Установленные параметры теплотворной способности древесины ели пораженной гнилью могут использоваться как качественные характеристики древесной массы для использования при производстве биотоплива. Следует отметить недостаточность исследований в данном направлении.

Финансирование

Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках государственных заданий ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства, регистрационный номер темы: 123022800118-4.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочитают не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The publication was prepared based on the results of research carried out within the framework of the state assignments of the FBI "NORTHERN RESEARCH INSTITUTE OF FORESTRY" for conducting applied scientific research in the field of activity of the Federal Forestry Agency, registration number of the topic: 123022800118-4.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Боровиков А.М. Справочник по древесине / А.М. Боровиков, Б.Н. Уголев. — Москва: Лесн. пром-сть, 1989. — 296 с.
2. Журавлев И.И. Диагностика болезней леса / И.И. Журавлев — Москва: Изд-во сельскохоз. лит-ры, журналов и плакатов, 1962. — 192 с.
3. Кононов Г.Н. Микелиз древесины, его продукты и их использование / Г.Н. Кононов, А.Н. Веревкин, Ю.В. Сердюкова и др. // Лесной вестник. — 2020. — 5. — с. 89-96. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-89-96.
4. Коптев С.В. Фауна северотаежных ельников / С.В. Коптев // Лесной журнал. — 1992. — 1. — с. 9-15.
5. Коптев С.В. Свойства волокон древесины ели, пораженной гнилью / С.В. Коптев, С.А. Васькин, Ю.В. Севастьянова и др. // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. — 2024. — 1(247). — с. 264-277. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.247.264-277.
6. Рабинович М.Л. Теоретические основы биотехнологии древесных композитов. Кн. I. Древесина и разрушающие ее грибы / М.Л. Рабинович — Москва: Наука, 2001. — 264 с.
7. Фенгел Д. Древесина (химия, ультраструктура, реакции) / Д. Фенгел, Г. Вегенер — Москва: Лесн. пром-сть, 1988. — 512 с.

8. Щудло Т.С.. Совместное сжигание угля и биомассы в факельных котлоагрегатах / Т.С. Щудло, Н.И Дунаевская, И.В Бесценный, Д.Л Бондзик // Материалы VIII Всероссийской конференции «Горение твердого топлива» ; под ред. Алексеенко С.В — Вып. 1. — Новосибирск : Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2012. — с. 1-8.
9. Ahmad A. Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation / A. Ahmad // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2016. — 53. — p. 1333-1347.
10. Aniszewska M. Analysis of selected physical properties of conifer cones with relevance to energy production efficiency / M. Aniszewska // Forests. — 2018. — 9. — p. 1-13.
11. Bożym M. Assessment of the composition of forest waste in terms of its further use / M. Bożym // Materials. — 2021. — 4. — p. 973-984. DOI: 10.3390/ma14040973.
12. Ebadian M. Evaluating the Economic Viability of Agricultural Pellets to Supplement the Current Global Wood Pellets Supply for Bioenergy Production / M. Ebadian // Energies. — 2021. — 14. — p. 2-15.
13. Gendek A. Energy value of silver fir (*Abies alba*) and Norway spruce (*Picea abies*) wood depending on the degree of its decomposition by selected fungal species / A. Gendek // Renewable Energy. — 2023. — 215. — p. 1-11. DOI: 10.1016/j.renene.2023.118948.
14. Gonçalves A. C. Energy production from forest biomass: an overview / A. C. Gonçalves, I. Malico // Forest Biomass-From Trees to Energy. — 2021. — 1. — p. 1-12.
15. Harker A.P. Calorific Values for Wood and Bark and a Bibliography for Fuelwood / A.P. Harker, A. Sandels, J. Burley // Tropical Products Institute. — 1982. — 162. — p. 1-20.
16. Mudryk K. Innovative production technology of high quality pellets for power plants / K. Mudryk // Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation: ICORES 2017. — 2018. — 1. — p. 701-712.
17. Orémusová E. Evaluation of the Gross and Net Calorific Value of the Selected Wood Species / E. Orémusová, L. Tereňová, R. Reh // Advanced Materials Research. — 2014. — 1001. — p. 292-299. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1001.292.
18. Vidholdová Z. Changes in chemical structure of thermally modified spruce wood due to decaying fungi / Z. Vidholdová // Journal of fungi. — 2022. — 7. — p. 1-12.
19. Zając G. Chemical characteristics of biomass ashes / G. Zając // Energies. — 2018. — 11. — p. 1-12. DOI: 10.3390/en11112885.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Borovikov A.M. Spravochnik po drevesine [Handbook of wood] / A.M. Borovikov, B.N. Ugolev — Moscow: Forestry industry, 1989. — 296 p. [in Russian]
2. Zhuravlev I.I. Diagnostika boleznj lesa [Diagnostics of forest diseases] / I.I. Zhuravlev — Moskva: Publishing house of the rural economy. literature, magazines and posters, 1962. — 192 p. [in Russian]
3. Kononov G.N. Mikoliz drevesiny, ego produkty i ih ispol'zovanie [Mycolysis of wood, its products and their use] / G.N. Kononov, A.N Verevkin, Ju.V Serdjukova et al. // Forestry Bulletin. — 2020. — 5. — p. 89-96. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-89-96. [in Russian]
4. Koptev S.V. Fautnost' severotaezhnyh el'nikov [Fauteness of the North taiga spruce forests] / S.V. Koptev // Forestry Journal. — 1992. — 1. — p. 9-15. [in Russian]
5. Koptev S.V. Svoystva volokon drevesiny eli, porazhennoj gnij'u [Properties of spruce wood fibers affected by rot] / S.V. Koptev, S.A. Vas'kin, Ju.V. Sevast'janova et al. // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy. — 2024. — 1(247). — p. 264-277. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.247.264-277. [in Russian]
6. Rabinovich M.L. Teoreticheskie osnovy biotekhnologii drevesnyh kompozitov. Kn. I. Drevesina i razrushajuschie ee griby [Theoretical foundations of alien biotechnology. Book I. Wood and wood-destroying fungi] / M.L. Rabinovich — Moskva: Nauka, 2001. — 264 p. [in Russian]
7. Fengel D. Drevesina (himija, ul'trastruktura, reaktsii) [Wood (chemistry, ultrastructure, reactions)] / D. Fengel, G. Vegener — Moscow: Forestry industry, 1988. — 512 p. [in Russian]
8. Schudlo T.S.. Sovmestnoe szhiganie uglja i biomassy v fakel'nyh kotloagregatah [Co-combustion of coal and biomass in flare boilers] / T.S. Schudlo, N.I Dunaevskaja, I.V Bestsenyj, D.L Bondzik // Proceedings of the VIII All-Russian conference "Woe from Wit"; edited by Alekseenko S.V — Issue 1. — Novosibirsk : Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze SO RAN, 2012. — p. 1-8. [in Russian]
9. Ahmad A. Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation / A. Ahmad // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2016. — 53. — p. 1333-1347.
10. Aniszewska M. Analysis of selected physical properties of conifer cones with relevance to energy production efficiency / M. Aniszewska // Forests. — 2018. — 9. — p. 1-13.
11. Bożym M. Assessment of the composition of forest waste in terms of its further use / M. Bożym // Materials. — 2021. — 4. — p. 973-984. DOI: 10.3390/ma14040973.
12. Ebadian M. Evaluating the Economic Viability of Agricultural Pellets to Supplement the Current Global Wood Pellets Supply for Bioenergy Production / M. Ebadian // Energies. — 2021. — 14. — p. 2-15.
13. Gendek A. Energy value of silver fir (*Abies alba*) and Norway spruce (*Picea abies*) wood depending on the degree of its decomposition by selected fungal species / A. Gendek // Renewable Energy. — 2023. — 215. — p. 1-11. DOI: 10.1016/j.renene.2023.118948.
14. Gonçalves A. C. Energy production from forest biomass: an overview / A. C. Gonçalves, I. Malico // Forest Biomass-From Trees to Energy. — 2021. — 1. — p. 1-12.

15. Harker A.P. Calorific Values for Wood and Bark and a Bibliography for Fuelwood / A.P. Harker, A. Sandels, J. Burley // Tropical Products Institute. — 1982. — 162. — p. 1-20.
16. Mudryk K. Innovative production technology of high quality pellets for power plants / K. Mudryk // Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation: ICORES 2017. — 2018. — 1. — p. 701-712.
17. Orémusová E. Evaluation of the Gross and Net Calorific Value of the Selected Wood Species / E. Orémusová, L. Tereňová, R. Reh // Advanced Materials Research. — 2014. — 1001. — p. 292-299. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1001.292.
18. Vidholdová Z. Changes in chemical structure of thermally modified spruce wood due to decaying fungi / Z. Vidholdová // Journal of fungi. — 2022. — 7. — p. 1-12.
19. Zając G. Chemical characteristics of biomass ashes / G. Zając // Energies. — 2018. — 11. — p. 1-12. DOI: 10.3390/en11112885.