

---

---

# ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

---

---

Научная статья

УДК 620.91; DOI: 10.61260/2218-13X-2023-3-1-10

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОПЛИВА ИЗ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ И ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

**Иванова Ирена Викторовна.**

**Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,  
Санкт-Петербург, Россия.**

✉ **Русскова Ирина Германовна.**

**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
Санкт-Петербург, Россия**

✉ *russkova\_ig@spbstu.ru*

*Аннотация.* Исследованы некоторые особенности древесных отходов как топлива, оценено их влияние на процесс газификации. Изучены различные теплотехнические характеристики опытных образцов древесины и определен состав рабочей массы топлива из древесных отходов (топливная щепа и опилки). Результаты исследований показали, что древесные отходы отличаются от древесного топлива только повышенным содержанием золы и влаги. Предложена методика, определяющая оптимальное значение параметров процесса сжигания и в первую очередь влажности образцов. Это способствует получению высоко калорийного генераторного газа и снижает затраты на подсушку отходов до абсолютно сухого состояния.

Сделаны выводы об экологичности и перспективности использования древесных отходов как альтернативного, эффективного и экологически чистого топлива.

*Ключевые слова:* экология, древесная биомасса, теплотехнические характеристики, влажность, зольность, выход летучих, теплота сгорания, газификация

**Для цитирования:** Иванова И.В., Русскова И.Г. Исследование теплотехнических характеристик топлива из древесных отходов и их экологической безопасности // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2023. № 3. С. 1–10. DOI: 10.61260/2218-13X-2023-3-1-10.

Scientific article

## INVESTIGATION OF HEAT TECHNICAL CHARACTERISTICS OF FUEL FROM WOOD WASTE AND THEIR ENVIRONMENTAL SAFETY

**Ivanova Irena.V.**

**Saint-Petersburg state forest technical university named after S.M. Kirov,  
Saint-Petersburg, Russia.**

**Russkova Irina.G.**

**Saint-Petersburg polytechnic Peter the Great university, Saint-Petersburg, Russia**

✉ *russkova\_ig@spbstu.ru*

*Abstract.* In this article, some features of wood waste as a fuel are investigated, and their influence on the gasification process is assessed. Various thermal characteristics of prototype wood

samples were studied and the composition of the working mass of fuel from wood waste (fuel chips and sawdust) was determined. The results of the research showed that wood waste differs from wood fuel only in an increased content of ash and moisture. A technique is proposed that determines the optimal value of the parameters of the combustion process and, first of all, the moisture content of the samples. This contributes to the production of high-calorific producer gas and reduces the cost of drying waste to a completely dry state.

Conclusions are drawn about the environmental friendliness and prospects for the use of wood waste as an alternative, efficient and environmentally friendly fuel.

*Keywords:* ecology, woody biomass, thermal characteristics, humidity, ash content, release of volatiles, heat of combustion, gasification

**For citation:** Ivanova I.V., Russkova I.G. Investigation of heat technical characteristics of fuel from wood waste and their environmental safety // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2023. № 3. P. 1–10. DOI: 10.61260/2218-13X-2023-3-1-10.

## Введение

Нет сомнений, что в ближайшее время и на долгие годы древесные отходы станут основным видом топлива для предприятий лесозаготовительной и деревоперерабатывающей промышленности в Российской Федерации. Для подобного утверждения есть несколько причин:

– заканчиваются запасы традиционных видов топлива (природного газа, нефти, каменного угля) в разрабатываемых месторождениях. С учетом разведанных месторождений, по мнению некоторых независимых экспертов – оптимистов, природных ресурсов хватит на 70 лет;

– экологические проблемы при сжигании природных топлив становятся все острее и требуют немедленного решения, иначе человечество задохнется от вредных выбросов, которые ежедневно, ежечасно выбрасываются в атмосферу теплосиловыми установками, работающими на традиционных видах топлива. Первое место по вредным выбросам в атмосферу занимают отопительные, производственно-отопительные котельные, тепловые электростанции (ТЭС) и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ).

Если для России с ее огромными запасами каменного угля, нефти, газа срок их исчезновения отодвигается на значительно позднее время, то несмотря на это назревает серьезный кризис в топливно-энергетическом секторе страны: непрерывный рост цен и тарифов на природный газ, мазуты, жидкое топливо, каменный уголь, на электроэнергию и тепловую энергию – все это ведет к увеличению топливно-энергетической составляющей в себестоимости продукции предприятий [1]. Снижается рентабельность предприятий, продукция становится не конкурентоспособной.

В России свыше 60 % территорий, на которых проживает до 10 % населения, отсутствует централизованное электроснабжение. Удаленные от систем центрального электроснабжения населенные пункты обеспечиваются местными теплоэнергетическими установками, работающими на привозном твердом или жидком топливе [2]. Говорить о рентабельности предприятий в этих населенных пунктах не приходится.

Еще одна причина, которая уже оказывает влияние на рост цен на электроэнергию и будет оказывать по нарастающей в далекой перспективе – электрическая энергосистема, построенная за годы советской власти, выработала или почти выработала свой ресурс и требует капитального ремонта. Затраты на ремонт энергосетей, электростанций и т.д. обязательно будут включены в себестоимость электрической энергии. В этих условиях является естественным повышенное внимание, проявляемое предприятиями лесной отрасли к дешевому, возобновляемому источнику энергии.

Ряд предприятий отрасли использует паровые котлы фирмы ОАО «Бийский котельный завод», паровые турбины малой мощности фирмы ОАО «Калужский турбинный завод» собственной, в несколько раз более дешевой электроэнергии и тепловой

энергии на древесных отходах. Успешно работают паротурбинные установки на деревообрабатывающем комбинате «Солдек» (г. Сокол), «Лесдок» (г. Харовск, Вологодской области), фанерном заводе «Новатор» (г. Великий Устюг, Вологодской области) и ряде других крупных предприятий. В установках подобного типа древесные отходы сжигают в виде щепы (измельченные на рубительной машине древесные отходы), пеллет (гранул) или брикетов, то есть в том или ином виде предварительно подготовленные отходы.

Учитывая, что для сжигания древесных отходов обязательно требуется предварительная подготовка для теплоэнергетических установок предприятий небольшой мощности, предприятий и населенных пунктов, удаленных от систем теплоэнергоснабжения, для топочных устройств специального назначения будет интересным и экологически обоснованным предварительная глубокая переработка древесных отходов в газообразное топливо [3]. Данное направление является востребованным на сегодняшний день, ведется множество разработок и исследований в этой области.

### Методы исследования

В настоящее время есть необходимость в использовании новых взглядов и методов исследования, а в некоторых случаях и постановки новых задач исследования теплотехнических характеристик древесной биомассы, основанных на сравнительном анализе. В данной работе применяется метод лабораторного анализа для энергетической и экологической оценки использования различных отходов древесного топлива для целей получения тепловой энергии.

Газообразное топливо имеет ряд преимуществ перед любыми другими видами топлива. Газообразное топливо можно транспортировать на любые расстояния, хранить в специальных емкостях (газгольдерах), газ хорошо горит и полностью сгорает, не выделяя сажистых отложений, при минимальном коэффициенте избытка воздуха. Предварительная газификация древесных отходов единственный способ, который позволяет заменить жидкое топливо на электрических станциях с дизельным двигателем или газотурбинными установками. Перевод котельных агрегатов, сушильных установок, двигателей внутреннего сгорания на генераторный газ не требует серьезных капитальных затрат. Экологичность этого топлива очевидна.

Положительные свойства газообразного топлива в значительной мере покрывают затраты предприятия на переработку древесных отходов в генераторный газ.

Процесс переработки древесных отходов в газообразное топливо или газификация древесных отходов представляет собой термохимический процесс при высоких температурах, в котором участвуют древесные отходы, их влага и воздух в количествах, значительно меньших, чем это необходимо для полного сгорания отходов. Полученный газ называют газифицированным, а аппарат, в котором он образуется, – газогенератором [4].

Процесс газификации твердых топлив, как правило, низкосортных, известен давно. Достаточно глубоко изучался и широко использовался особенно в 30–50-х гг. прошлого века. Газифицировались каменный уголь, бурый уголь, сланцы, торф, древесное топливо. Качество древесного топлива для последующей газификации определялось по ГОСТ-2720-44, в котором были оговорены: порода древесины (в первую очередь береза, бук, граб, ясень и т.д., в последнюю – осина, ель, сосна), относительная влажность 15...18 %, размеры газогенераторной чурки 4×7×10 см и т.д. Казалось бы, при таком серьезном подходе к проблеме газификации низкосортных топлив, богатому опыту по эксплуатации газогенераторных установок, накопленному за многие годы, перевод на газификацию древесных отходов не должен вызвать каких-либо затруднений. Однако на практике оказалось, что процесс газификации древесных отходов в значительной степени отличается от стандартизированной газогенераторной чурки. Причина отличия заключается в целом ряде

свойств, присущих только древесным отходам, которые определенным образом оказывают непустое влияние на процесс газификации.

В данной статье сделана попытка исследовать некоторые особенности древесных отходов как топлива и их влияние на процесс газификации.

Ежегодно на предприятиях лесопромышленного комплекса образуется до 70 млн т древесных отходов. По своему происхождению, природе и свойствам их можно разделить на три вида: отходы лесозаготовок, которые составляют до 60 % от массы заготавливаемой древесины; отходы лесопильных предприятий, их доля составляет в среднем до 56 % от общей массы обрабатываемой древесины; отходы деревообрабатывающих предприятий, которые составляют 30 % от общей массы обработанной древесины.

Отходы лесозаготовительного производства – это вершины, ветви, сучья, хвоя, листья и пр. В естественной форме лесосечные отходы нетранспортабельны и поэтому их измельчают перед вывозкой к месту потребления. Лесосечные отходы имеют высокую влажность, в зависимости от времени года (весна, лето, зима) она достигает 40...50 %. При этом всегда влажность ветвей, листьев, хвои выше, чем влажность торцевой части хлыста.

В чистом виде древесина содержит 0,6...1,0 % золы. Лесосечные отходы имеют повышенное содержание золы за счет минеральных примесей попадающих при заготовке, трелевке и транспортировке древесины на нижний склад.

Отходы лесопиления – кора, горбыль, рейка срезки, короткомеры. Кора представляет собой верхний слой дерева, удаленный при окорке перед распиловкой. Перед подачей в топку иногда кору измельчают. Она может содержать до 80 % влаги (кора сплавной древесины). Горбыль – периферийная часть кряжа, отделяемая при его распиловке. Большая часть горбыля идет на технологическую щепу и только низкосортная идет на топливную щепу. Рейка – боковая часть доски, отделяемая при продольной распиловке. Перед подачей в топку обычно дробится.

Отходы деревообрабатывающих предприятий – стружка, опилки, отходы производства технологической щепы, кусковые отходы различной формы и размеров.

Использование древесных отходов в качестве топлива имеет ряд преимуществ по сравнению с другими, традиционными видами топлива. Древесное топливо содержит незначительное количество серы и фосфора, что позволяет снизить температуру продуктов сгорания до 110...120 °С; древесное топливо является возобновляемым источником энергии; древесные отходы как вид топлива имеют нулевую стоимость, чаще всего их энергетическое использование позволяет ликвидировать затраты предприятия на их вывозку в отвалы; древесное топливо – экологически чистое топливо; высокая реакционная способность древесины позволяет сжигать ее при низкой температуре, что снижает выбросы азота в атмосферу.

Древесное топливо и особенно древесные отходы обладают рядом существенных недостатков, которые сдерживают его энергетическое использование. Из перечисленных видов отходов большинство требует измельчения перед подачей в топку котла, в газогенератор и т.д.

Отходы в естественном виде обладают высокой влажностью и, что не менее существенно, влажность отходов изменяется по высоте слоя. Древесина гигроскопична, она непрерывно или отдает, или поглощает влагу из окружающей среды. Влагосодержание древесных отходов величина непрерывно меняющаяся, что не позволяет управлять процессом горения.

Древесные отходы как топливо имеют низкую теплоту сгорания. Максимально возможная теплота сгорания абсолютно сухих отходов лежит в пределах 18,4...19 МДж/кг. Теплота сгорания зависит от влажности отходов и уменьшается с повышением их влажности [5].

Фракционный состав древесных отходов даже после измельчения колеблется в широких пределах от 1...50 мм. Это затрудняет подвод воздуха в зону горения и вызывает неравномерность интенсивности процесса горения по площади слоя топлива.

### Результаты исследования и их обсуждение

Проведены исследования теплотехнических характеристик трех основных видов древесных отходов опилок, топливной щепы и коры хвойных пород в лаборатории кафедры промышленной энергетики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета (СПбГЛТУ).

Опилки для анализа взяты на пилораме с циркулярной пилой, имеют удлиненную форму, сворачиваются, образуя трудно продуваемые и плохо проходящие в топливных котлах комья. При газификации, возможно, потребуются дробление или измельчение.

Топливая щепа получена путем измельчения древесных отходов березы, хвойных пород, ольхи. Фракционный состав щепы (частицы размером примерно 5×30×50 мм) составляет 70...80 %, остальные мелкие фракции.

Кора для опытов взята со свежесрубленной хвойной древесины (в основном сосна).

Определение характеристик проведено по стандартной методике: сушка отходов при температуре 102...105 °С до постоянной массы, три пробы [6]; зольность определялась при температуре 820 °С до прекращения горения, три пробы [7]; определение выхода летучих горючих веществ при температуре 820 °С [8] до полного прекращения горения факела над отверстием крышки, закрывающей тигль. Средние значения характеристик приведены в табл. 1.

Средние значения влажности  $W^p$ , зольности  $A^p$ , летучих веществ  $V^l$  и кокса древесных отходов найдены опытным путем в лаборатории кафедры промышленной энергетики СПбГЛТУ.

Таблица 1

Значения теплотехнических характеристик опытных образцов

№ п/п	Отходы	$W^p$ , %	$A^p$ , %	$V^l$ , %	Кокс, %
1	Опилки	30,02	0,42	82,2	17,8
2	Топливая щепа	14,7	1,802	84,1	15,9
3	Кора хвойных пород	49,8	1,41	71,3	28,7

Теплота сгорания отходов определялась расчетным путем по следующей общепризнанной методике [9]. Известно, что состав сухой массы определяется содержанием золы в древесных отходах. Уравнение элементарного состава сухой массы древесных отходов выглядит следующим образом:

$$C^c + H^c + O^c + N^c + A^c = 100 \text{ \%}$$

В процессе опытов определена зольность рабочей массы каждого из испытуемых видов отходов при соответствующей влажности  $W^p$ .

Умножив значение найденной зольности  $A^p$  на коэффициент пересчета  $\frac{100}{100 - W^p}$ , найдем зольность сухой массы, которую обозначим  $A_2^c$ :

$$A_2^c = A^p \cdot \frac{100}{100 - W^p}$$

В литературе [5, 9, 10] приводится состав сухой массы древесного топлива при зольности  $A_1^c = 0,6\%$  и отмечается, что сухая масса топлива изменяется только с изменением зольности  $A^p$ . Состав сухой массы древесного топлива:  $C^c = 50\%$ ,  $H^c = 6\%$ ,  $O^c = 43,3\%$ ,  $N^c = 0,1\%$ ,  $A_1^c = 0,6\%$ .

Древесные отходы отличаются от древесного топлива только повышенным содержанием золы и влаги. Это дает возможность воспользоваться приведенным составом и пересчитать сухую массу отходов при зольности  $A_1^c$  на сухую массу отходов с зольностью  $A_2^c$  по уравнению типа:

$$C_2^c = C_1^c \cdot \frac{100 - A_1^c}{100 - A_2^c} \quad (1)$$

В уравнении (1) выражение  $\frac{100 - A_1^c}{100 - A_2^c}$  представляет собой коэффициент пересчета от сухой массы отходов с одной зольностью к сухой массе отходов с другой зольностью.

После пересчета получим состав сухой массы, например, для опилок с  $A^p = 1,802\%$  и влажностью  $W^p = 15\%$  следующего содержания:  $C^c = 49,24\%$ ,  $H^c = 5,91\%$ ,  $O^c = 42,65\%$ ,  $N^c = 0,098\%$ ,  $A^c = 2,12\%$ .

Подобная методика позволяет найти по опытным значениям  $A^p$  и  $W^p$  элементарный состав рабочей массы древесных отходов при любой влажности  $W^p$ . По изменению состава рабочей массы древесных отходов можно проследить изменение теплоты сгорания отходов в зависимости от изменения влажности и зольности. Результаты таких расчетов для опилок, топливной щепы и коры приведены в табл. 2–4.

Таблица 2

**Состав рабочей массы топлива из древесных отходов (опилки)**

Влажность, $W^p, \%$	Элементы состава рабочей массы древесных отходов					
	$C^p, \%$	$H^p, \%$	$O^p, \%$	$N^p, \%$	$A^p, \%$	$Q_n^p, \text{кДж/кг}$
0	50,00	6,0	43,3	0,1	0,6	18 415
5	47,5	5,7	41,135	0,095	0,57	17 493
10	45,0	5,4	38,97	0,09	0,54	16 574
15	42,5	5,1	36,8	0,085	0,51	15 652
20	40,0	4,8	34,64	0,0795	0,48	14 732
25	37,5	4,5	32,47	0,075	0,45	13 811
30	35,0	4,2	30,31	0,069	0,42	12 890
40	30,0	4,2	25,98	0,059	0,36	11 049
50	25,0	3,0	21,98	0,05	0,3	9 207

Из полученных результатов следует, что с ростом влажности отходов теплота сгорания снижается не только потому, что часть ее идет на превращение влаги топлива в пар, но и потому, что с ростом влажности падает содержание горючих элементов ( $C^p$ ,  $H^p$ ) в топливе.

Для газификации отходов с учетом восстановления водяных паров на водород  $H_2$  и окись углерода  $CO$  желательно использовать воздушно-сухие древесные отходы с влажностью не более  $W^p = 15...20\%$ . При этой влажности теплота сгорания отходов достаточно высокая, что способствует получению высококалорийного генераторного газа, снижает затраты на подсушку отходов до абсолютно сухого состояния.

Аналогичные итоги расчетов представлены для топливной щепы и коры. В этих отходах более высокое содержание золы и можно проследить изменение состава рабочей массы с ростом содержания золы при тех же, что и в табл. 1 значениях влажности.

Таблица 3

**Состав рабочей массы топлива из древесных отходов (топливная щепа)**

Влажность, $W^p$ , %	Элементы состава рабочей массы древесных отходов					
	$C^p$ , %	$H^p$ , %	$O^p$ , %	$N^p$ , %	$A^p$ , %	$Q_n^p$ , кДж/кг
0	49,24	5,91	42,65	0,098	2,12	18 135
5	46,78	5,61	40,50	0,093	2,014	17 223
10	44,32	5,32	38,37	0,088	1,908	16 324
15	41,854	5,02	36,25	0,083	1,802	15 410
20	39,39	4,73	34,12	0,078	1,696	14 507
25	36,93	4,43	31,99	0,074	1,59	13 600
30	34,46	4,14	29,9	0,069	1,48	12 692
40	29,54	3,55	25,59	0,059	1,272	10 880
50	24,62	2,955	21,32	0,049	1,06	9 068

Из табл. 3 видно, что благодаря большому содержанию золы в топливной щепе ее теплота сгорания снизилась в среднем на 280 кДж/кг. Это существенно при больших расходах топливной щепы.

Таблица 4

**Состав рабочей массы топлива из древесных отходов (кора хвойных пород)**

Влажность, $W^p$ , %	Элементы состава рабочей массы древесных отходов					
	$C^p$ , %	$H^p$ , %	$O^p$ , %	$N^p$ , %	$A^p$ , %	$Q_n^p$ , кДж/кг
0	48,88	5,86	42,33	0,098	2,82	17 998
5	46,44	5,57	40,21	0,093	2,68	17 980
10	44,0	5,27	38,1	0,088	2,54	16 188
15	41,56	4,98	35,98	0,083	2,4	15 298
20	39,108	4,69	33,86	0,078	2,26	14 398
25	36,66	4,39	31,75	0,073	2,11	13 488
30	34,22	4,1	29,63	0,068	1,974	12 599
40	29,33	3,52	25,4	0,059	1,69	10 798
50	24,4	2,93	21,16	0,05	1,41	8 999

Древесная кора по своим теплотехническим характеристикам отличается от опилок, топливной щепы и других древесных отходов. Определение элементов рабочей массы коры найдено по горючей массе, приведенной в работе [10], с использованием опытных значений золы  $A^p$  и влаги  $W^p$ , по уравнениям типа:

$$C^p = C^r \cdot \frac{100 - W^p - A^p}{100},$$

где  $C^p$  – содержание углерода в рабочей массе, %;  $C^r$  – содержание углерода в горючей массе, %;  $W^p$ ,  $A^p$  – соответственно, содержание влаги и золы в рабочей массе топлива, %.

Найденные состав и теплота сгорания позволят определить расчетным путем состав генераторного газа из перечисленных отходов, его теплоту сгорания, КПД газогенератора и выявить зависимость теплоты сгорания газа от элементного состава газифицируемых отходов [11].

Таким образом, используя данное сырье как побочный продукт лесозаготовки, удастся решить сразу несколько экологических проблем: снизить объемы заготовок древесного сырья как топлива в виде традиционных форм заготовленной древесины, минимизировать углеродный след и, как следствие, сократить объем парниковых газов, ответственных за потепление климата на планете, а также снизить величину поступления оксидов серы и азота в атмосферу, влияющих на образование кислотных дождей.

### Заключение

В состав рабочей массы древесины входит зола и влага. Известно, что зола, образующаяся при сгорании древесины из минеральных частиц ее клеток, составляет чуть более 1 %. Поэтому древесная биомасса считается самым беззольным из твердых топлив. Однако необходимо иметь в виду, что при заготовке, трелевке и перевозке древесины к ней и особенно к ее коре прилипают минеральные частицы грунта, сильно увеличивающие ее зольность. Поэтому такая приобретенная зольность древесных отходов может достигать 15 % и даже 20 %. Влажность древесного топлива также колеблется в очень широких пределах. Свежесрубленная древесина содержит 30...50 % влаги, а пролежавшая лето 20...30 %. Влажность отходов деревообрабатывающих производств в зависимости от места произрастания, способа транспортировки и хранения колеблется обычно в пределах от 5 до 20 %. Влажность отходов лесопильного производства составляет 10...50 %, сплавной коры до 80 %. Смешанные древесные отходы на лесозаготовительных предприятиях в среднем имеют влажность 40...50 %.

Еще недавно стремление использовать в качестве топлива биомассу, в частности древесные отходы, базировалось на следующих соображениях. Во-первых, многие виды биомасс, например, древесина, являются единственным топливом, самовозобновляющимся, при чем в больших объемах. Во-вторых, немаловажную роль сыграл и экологический аспект проблемы. Древесное топливо практически не содержит серы, имеет высокую реакционную способность и умеренные температуры горения. В продуктах сгорания этого топлива не содержится серного и сернистого газа, а количество окиси углерода и окислов азота при рациональных методах сжигания, может быть сведено к минимуму. К экологическим аспектам проблемы относится также наличие на многих предприятиях залежей гниющих древесных отходов, отравляющих воду, почву и воздух, объемы которых можно снизить за счет сжигания древесной биомассы.

### Список источников

1. Биоэнергетика как альтернатива традиционным источникам энергии / Д.Ю. Руди [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал «INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL». 2016. № 5 (47). С. 162–163.
2. Иванова И.В., Дейс А.Д. Рациональное ресурсо- и теплоиспользование в лесной промышленности: сб. статей по материалам науч.-техн. конф. Института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ – 2019. СПб.: СПбГЛТУ, 2020. С. 119–127.
3. Cho J., Joseph D. Heterogeneous model for moving bed gasification reactor // *Industrial and Eng Chemistry Des. and Development*. 1981. Vol. 20. № 2. S. 314–318.
4. Assessment of Energy Wood Resources in the Leningrad Region / T. Karjalainen [et al.] // *Developing Bioenergy Market – Focus on Forest Sector and Russia*. Lappeenranta, 2006. 20 p.



5. Иванова И.В., Иванов М.М. К вопросу о прямом сжигания биомассы для получения тепловой энергии: сб. статей по материалам науч.-техн. конф. Института технологических машин и транспорта леса по итогам научно-исследовательских работ – 2020. СПб.: СПбГЛТУ, 2021. С. 184–191.

6. ГОСТ Р 52911–2013. Топливо твердое минеральное. Определение общей влаги. М.: Стандартиформ, 2014. 11 с.

7. ГОСТ 11022–95 (ИСО 1171–97). Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности (с изм. № 1). М.: Стандартиформ, 2006. 6 с.

8. ГОСТ 6382–2001 (ИСО 562–98, ИСО 5071-1–97). Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода летучих веществ. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002. 19 с.

9. Гомонай М.В. Производство топливных брикетов. Древесное сырье, оборудование, технологии, режимы работы: монография. М.: Изд-во МГУЛ, 2006. 68 с.

10. Энергетическое использование древесной биомассы: заготовка, транспортировка, переработка и сжигание: учеб. пособие / В.С. Сюнев [и др.]. Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2014. 123 с.

11. Теория горения и взрыва. Учебник и практикум: учеб. пособие для студ. вузов / ред. А.В. Тотай, О.Г. Казаков. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2014. 295 с.

### References

1. Bioenergetika kak al'ternativa tradicionnym istochnikam energii / D.Yu. Rudi [i dr.] // Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal «INTERNATIONAL RESEARCH JOURNAL». 2016. № 5 (47). S. 162–163.

2. Ivanova I.V., Dejs A.D. Racional'noe resurso- i teploispol'zovanie v lesnoj promyshlennosti: sb. statej po materialam nauch.-tekhn. konf. Instituta tekhnologicheskikh mashin i transporta lesa po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot – 2019. SPb.: SPbGLTU, 2020. S. 119–127.

3. Cho J., Joseph D. Heterogeneous model for moving bed gasification reactor // Industrial and Eng Chemistry Des. and Development. 1981. Vol. 20. № 2. S. 314–318.

4. Assessment of Energy Wood Resources in the Leningrad Region / T. Karjalainen [et al.] // Developing Bioenergy Market – Focus on Forest Sector and Russia. Lappeenranta, 2006. 20 p.

5. Ivanova I.V., Ivanov M.M. K voprosu o pryamom szhiganiya biomassy dlya polucheniya teplovoj energii: sb. statej po materialam nauch.-tekhn. konf. Instituta tekhnologicheskikh mashin i transporta lesa po itogam nauchno-issledovatel'skikh rabot – 2020. SPb.: SPbGLTU, 2021. S. 184–191.

6. GOST R 52911–2013. Topливо tverdoe mineral'noe. Opredelenie obshchej vlagi. M.: Standartinform, 2014. 11 s.

7. GOST 11022–95 (ISO 1171–97). Topливо tverdoe mineral'noe. Metody opredeleniya zol'nosti (s izm. № 1). M.: Standartinform, 2006. 6 s.

8. GOST 6382–2001 (ISO 562–98, ISO 5071-1–97). Topливо tverdoe mineral'noe. Metody opredeleniya vyhoda letuchih veshchestv. M.: IPK Izd-vo standartov, 2002. 19 s.

9. Gomonaj M.V. Proizvodstvo toplivnyh briketov. Drevesnoe syr'e, oborudovanie, tekhnologii, rezhimy raboty: monografiya. M.: Izd-vo MGUL, 2006. 68 s.

10. Energeticheskoe ispol'zovanie drevesnoj biomassy: zagotovka, transportirovka, pererabotka i szhiganiye: ucheb. posobie / V.S. Syunev [i dr.]. Petrozavodsk: Izd-vo PetrGU, 2014. 123 s.

11. Teoriya goreniya i vzryva. Uchebnik i praktikum: ucheb. posobie dlya stud. vuzov / red. A.V. Totaj, O.G. Kazakov. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Yurajt, 2014. 295 s.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 15.06.2023; одобрена после рецензирования: 04.07.2023;  
принята к публикации: 10.07.2023

**Information about the article:**

The article was submitted to the editorial office: 15.06.2023; approved after review: 04.07.2023;  
accepted for publication: 10.07.2023

*Сведения об авторах:*

**Иванова Ирена Викторовна**, доцент кафедры промышленной энергетики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова (194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5), кандидат технических наук, e-mail: [irenalta@mail.ru](mailto:irenalta@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0009-4068-6741>, SPIN-код: 9424-7866

**Русскова Ирина Германовна**, доцент Высшей школы техносферной безопасности инженерно-строительного института Санкт-Петербургского Политехнического университета Петра Великого (195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29), кандидат технических наук, e-mail: [russkova\\_ig@spbstu.ru](mailto:russkova_ig@spbstu.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6867-850X>, SPIN-код: 9336-9420

*Information about authors:*

**Ivanova Irena V.**, associate professor of the department of industrial energy Saint-Petersburg state forestry university named after. S.M. Kirova (194021, Saint-Petersburg, Institutskiy per., 5), candidate of technical sciences, e-mail: [irenalta@mail.ru](mailto:irenalta@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0009-4068-6741>, SPIN: 9424-7866

**Russkova Irina G.**, associate professor of the Higher school of technospheric civil engineering institute of Peter the Great Saint-Petersburg polytechnic university (195251, Saint-Petersburg, Politekhnicheskaya st., 29), candidate of technical sciences, e-mail: [russkova\\_ig@spbstu.ru](mailto:russkova_ig@spbstu.ru), <http://orcid.org/0000-0002-6867-850X>, SPIN: 9336-9420