

УДК 674.81

DOI: 10.15393/j2.art.2018.4262

Обзор

Анализ исследований по повышению энергоэффективности измельчения отходов окорки

Дмитрий В. Бастриков¹, Ольга А. Куницкая^{2,*}

¹ Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г. Ф. Морозова, Россия, 394087, Воронежская область, г. Воронеж, ул. Тимирязева, 8; E-Mail: bastrikov@gmail.com (Д. Б.)

² Якутская государственная сельскохозяйственная академия, Россия, 677007, Якутск, ш. Сергеляхское, 3 км, дом 3; E-Mail: ola.ola07@mail.ru (О. К.)

* Автор, с которым следует вести переписку; E-Mail: ola.ola07@mail.ru (О. К.);
Tel.: +7-921-324-2547.

Получена: 26 ноября 2018 / Принята: 27 декабря 2018 / Опубликовано: 27 декабря 2018

Аннотация: Операция измельчения является одной из важнейших и наиболее энергоёмких процедур в цикле подготовки отходов окорки к утилизации, например, к производству биотоплива. В научной литературе практически отсутствуют математические модели, адекватно описывающие измельчение отходов окорки на современном оборудовании с ножевым рабочим органом (наиболее распространённом на практике). Исследования в технике, смежные с планируемыми, известны в области технологии производства строительных материалов и в горнорудной промышленности. Однако адаптация результатов исследований коллег к специфике лесоперерабатывающей отрасли невозможна без отдельных теоретических и экспериментальных исследований. Практическое отсутствие научного описания процесса приводит к неэффективным, необоснованным решениям по организации технологического процесса подготовки отходов окорки к утилизации, ведёт к увеличению энергозатрат на подготовку сырья. Как следствие, снижается общая эффективность функционирования перерабатывающих предприятий. Отходы окорки представляют собой куски коры с включением древесины (отщеп), массовая доля которой варьируется в зависимости от времени года. Разработанные способы использования коры принято разделять на четыре группы: сжигание коры для получения тепловой или электрической энергии; механическая переработка коры на строительные и изоляционные материалы; химическая переработка коры для

получения экстрактов и химикатов; биологическая переработка коры для приготовления компостов. Очевидным и наиболее доступным способом утилизации древесной коры является энергетический способ — использование коры в качестве топлива. Принято выделять: прямое сжигание коры, например, на целлюлозно-бумажных предприятиях, где кору сжигают в специальных котлоагрегатах высокой производительности (как правило, в смеси с другими видами топлива, например, щепой, углём или жидким топливом); сжигание брикетированной коры. О преимуществах брикетированного биотоплива хорошо известно. Важно отметить, что, помимо влажности сырья, на качество и прочность получаемых брикетов влияет фракционный состав сырья. Включение частиц древесины крупного размера резко снижает прочность брикетов.

Ключевые слова: отходы окорки, измельчение, измельчители с ножевым рабочим органом

DOI: 10.15393/j2.art.2018.4262

Review

Efficiency increase of barking waste grinding

Dmitry Bastrikov¹, Olga Kunitskaya^{2,*}

¹ Voronezh state forest engineering University named after G. F. Morozov, Russia, 394087, Voronezh region, Voronezh, 8, Timiryazev str.; E-Mail: bastrikov@gmail.com (D. B.)

² Yakut state agricultural Academy, Russia, 677007, Yakutsk, sh. Sergelyakhskoe, 3 km, building 3; E-Mail: ola.ola07@mail.ru (O. K.)

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: ola.ola07@mail.ru (O. K.); Tel.: +7-921-324-2547.

Received: 26 November 2018 / Accepted: 27 December 2018 / Published: 27 December 2018

Abstract: Shredding operation is one of the most important and energy-intensive operations in the cycle of barking waste preparation for recycling, for example, for biofuel production. In the scientific literature, there are practically no mathematical models adequately describing the grinding of barking waste using modern equipment with a knife working body as the most common tool. There are some research results in such related fields as those of building materials technology and in the mining industry. However, their adaptation to the specifics of the timber processing industry is impossible without proper theoretical and experimental studies. The lack of a process scientific description leads to inefficient and unreasonable decisions in the technological process organization of debarking waste preparation for disposal and leads to an increase in energy costs for the raw materials preparation. As a result, the overall efficiency of processing enterprises is reduced. Barking waste is pieces of bark with the inclusion of wood (chip), the mass fraction of which varies depending on the time of the year. The developed methods of using the bark are divided into four groups: burning the bark to produce heat or electricity; mechanical processing of the bark into construction and insulation materials; chemical processing of the bark to obtain extracts and chemicals; biological processing of the bark for composting. The obvious and most affordable way to dispose of wood bark is the energy method: the use of the bark as fuel. It is customary to distinguish between direct combustion of the bark, for example, in pulp and paper mills, where the bark is burned in special high-performance boilers (usually in a mixture with other fuels, for example, chips, coal or liquid fuel); burning of briquetted bark. The benefits of briquetted biofuel are well known. It is important to

note that, in addition to the moisture content of raw materials, the quality and strength of the resulting briquettes is affected by the fractional composition of raw materials. The inclusion of large-sized wood particles dramatically reduces the strength of the briquettes.

Keywords: barking waste, grinding, grinders with a knife working body

1. Введение

Разработанные способы использования коры и отходов окорки принято разделять на четыре группы: сжигание коры для получения тепловой или электрической энергии; механическая переработка коры на строительные и изоляционные материалы; химическая переработка коры для получения экстрактов и химикатов; биологическая переработка коры для приготовления компостов. Практически все способы предполагают переработку сырья крупностью не более 5 мм; при наличии большого количества отходов фракцией более 5 мм его необходимо измельчать. Наиболее предпочтительным оборудованием для измельчения отходов окорки являются измельчители с ножевыми рабочими органами, энергоэффективность работы которых требует дополнительных исследований.

2. Материалы и методы

Отходы окорки представляют собой куски коры с включением древесины (отщеп), массовая доля которой варьируется в зависимости от времени года. Сведения о содержании отщепа в отходах окорки представлены в таблице 1.

Таблица 1. Массовая доля отщепа в отходах окорки на роторных окорочных станках в зависимости от времени года [1—3] (Mass fraction of flakes in debarking waste on rotary debarking machines depending on the season)

Время года	Порода	Марка окорочного механизма	Массовая доля отщепа $\omega_{\text{древ}}$, %
Зима (февраль)	Сосна	ОК-66М	13
Весна (март)	Сосна	ОК-66М	8,8
Весна (май)	Сосна	ОК-66М	4,9
Лето (июль, август)	Сосна	ОК-66М	4,6
Осень (октябрь)	Сосна	ОК-66М	9,5
Зима (февраль)	Ель	ОК-66М, ВК-26	12,6
Весна (март)	Ель	ОК-66М, ВК-26	8,1
Весна (май)	Ель	ОК-66М, ВК-26	3,9
Лето (июль, август)	Ель	ОК-66М, ВК-26	4,6
Осень (октябрь)	Ель	ОК-66М, ВК-26	10,1

Для наглядности проиллюстрируем данные таблицы 1 графиками (рисунок 1).

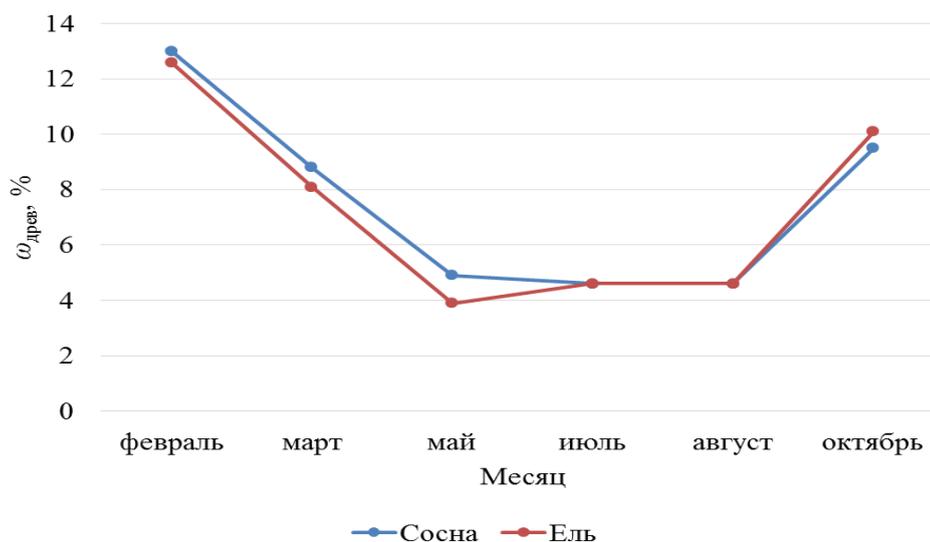


Рисунок 1. Содержание древесины (отщепа) в отходах окорки на роторных станках в зависимости от времени года (The content of wood (chips) in the waste debarking on rotary machines, depending on the time of year)

Графики и данные таблицы 1 показывают, что в холодное время года содержание древесины в отходах окорки достигает 13 %, летом — 5 %, что обусловлено повышенным сцеплением коры с древесиной при отрицательной температуре.

Рассмотрим фракционный состав отходов окорки в зависимости от времени года. Данные о фракционном составе отходов окорки сосны и ели, полученных после окорки сортиментов на роторных окорочных станках, представлены в таблице 2.

Таблица 2. Фракционный состав отходов окорки сосны и ели в зависимости от времени года [1], [2], [4] (Fractional composition of pine and spruce debarking waste depending on the season)

Порода	Время года	Остатки, %, по массе на сетках с ячейками диаметром, мм				
		30	20	10	5	Дно
Сосна	Зима	49	12	18	14	7
Сосна	Весна	58	14	12	11	5
Сосна	Лето	67	11	12	8	2
Сосна	Осень	62	14	13	9	2
Ель	Зима	57	13	18	7	5
Ель	Весна	42	24	22	7	5
Ель	Лето	51	21	19	6	3
Ель	Осень	40	24	20	9	7

Данные таблицы 2 проиллюстрированы графиками (рисунки 2, 3).

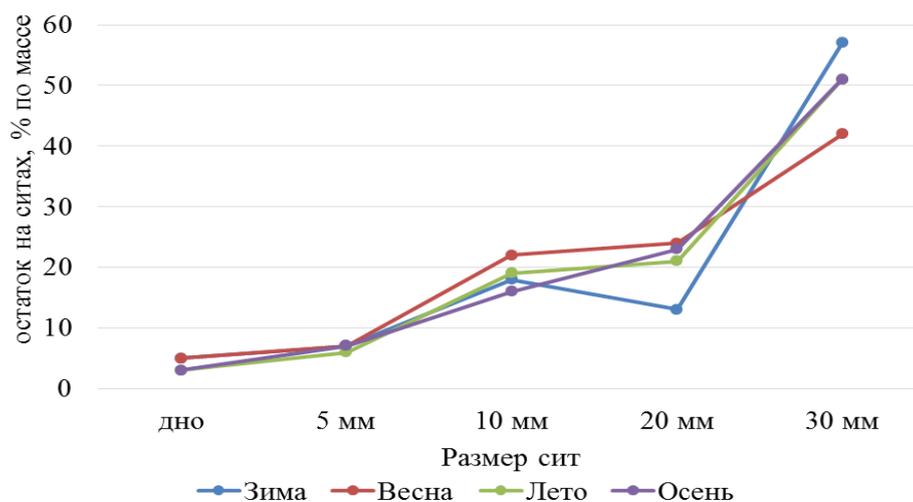


Рисунок 2. Фракционный состав отходов окорки ели в зависимости от времени года (Fractional composition of spruce debarking waste depending on the season)

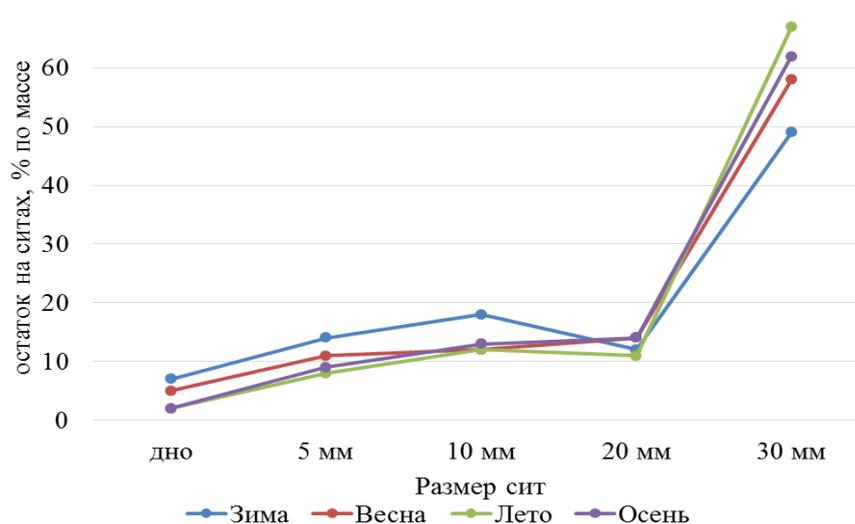


Рисунок 3. Фракционный состав отходов окорки сосны в зависимости от времени года (Fractional composition of the waste debarking pine trees depending on the time of year)

В [2] отмечено, что на ситах диаметром 30 мм остаются, в основном, куски коры и отщепы размером не более 100 мм, в летний период встречаются, однако, куски коры размером 400—500 мм и более.

Оценим закон распределения отходов окорки по крупности и их среднюю крупность. Для этого представим данные таблиц 1 и 2 в виде кумулянт на рисунках 4, 5.

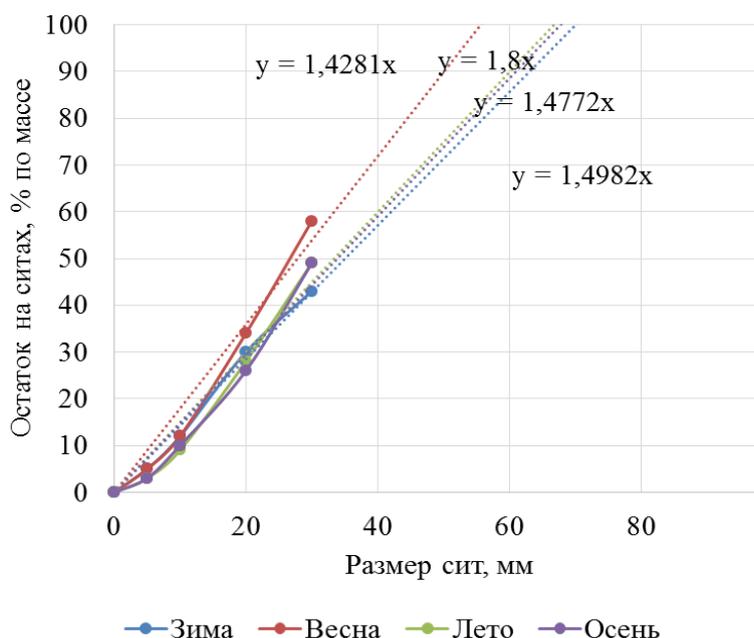


Рисунок 4. Кумуляты по фракционному составу отходов окорки ели в зависимости от времени года (Cumulate on the fractional composition of the waste debarking spruce depending on the time of year)

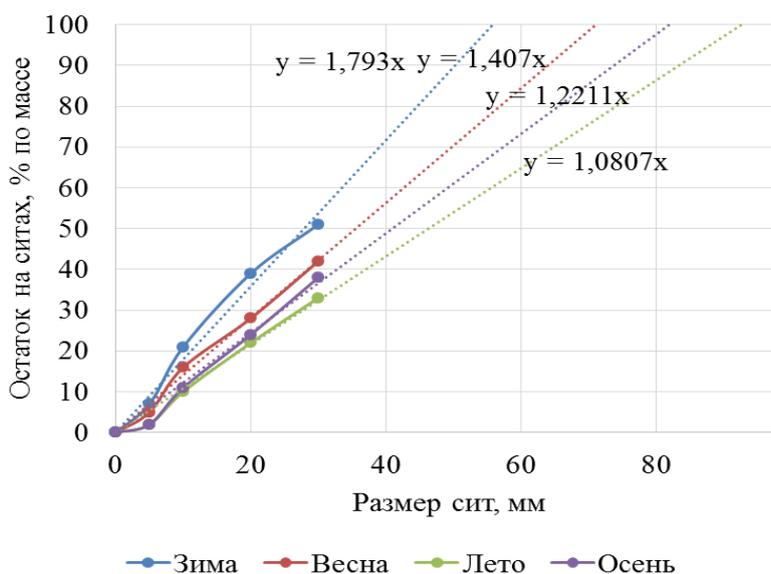


Рисунок 5. Кумуляты по фракционному составу отходов окорки сосны в зависимости от времени года (Cumulate on the fractional composition of the waste debarking pine trees depending on the time of year)

Кумуляты на рисунках 4, 5 практически точно аппроксимируются линейными функциями, из чего можно заключить, что закон распределения кусков отходов окорки соответствует закону равной плотности [5], [6].

В таблице 3 представлены результаты расчётов, выполненных в предположении о соблюдении закона равной плотности для распределения кусков отходов окорки по крупности. Верхние границы диапазонов варьирования вычислены по линейным аппроксимирующим функциям (рисунки 4, 5), математические ожидания определены как средние арифметические нижних (0 мм) и верхних границ диапазонов крупности.

Таблица 3. Математическое ожидание (средняя крупность) и верхняя граница диапазона варьирования (Mathematical expectation (average particle size) and the upper bound of the range of variation)

Порода	Время года	Верхняя граница, мм	Математическое ожидание (средняя крупность), мм
Сосна	Зима	55,8	27,9
Сосна	Весна	71,1	35,5
Сосна	Лето	81,9	40,9
Сосна	Осень	92,5	46,3
Ель	Зима	70,0	35,0
Ель	Весна	55,6	27,8
Ель	Лето	66,7	33,4
Ель	Осень	67,7	33,8

Таким образом, в наших исследованиях будем ориентироваться на измельчение материала средней крупностью до 50 мм, представленного кусками коры и отщепом древесины в соотношении 9:1.

Важным показателем, характеризующим отходы окорки, является их влажность. В работе [2] приводятся следующие данные об абсолютной влажности отходов окорки в зависимости от времени года, породы древесины и способа доставки лесоматериалов на предприятие (таблица 4).

Таблица 4. Абсолютная влажность отходов окорки древесины [2] (Absolute moisture content of wood debarking waste)

Месяцы	Древесина	<i>n</i>	<i>M</i>	σ	<i>m</i>	<i>V</i>	<i>P</i>	Примечание
Ноябрь	Сосна	35	257	5,2	0,83	7,3	1,14	Со склада
Декабрь	Сосна	30	203	7,3	1,3	11,1	1,85	Со склада
Январь	Сосна	40	212	5,4	0,8	8,1	8,18	Со склада
Февраль	Сосна	40	222	4,8	0,72	7,2	1,04	Со склада
Март	Сосна	44	233	4	0,58	5,8	0,83	Со склада
Апрель	Сосна	20	185	5	1,08	8	1,65	Со склада
Ноябрь	Ель	30	212	4,4	0,78	6,6	1,13	Со склада
Декабрь	Ель	30	170	4	0,7	6,6	1,11	Со склада
Январь	Ель	40	163	4,9	0,7	8,2	1,19	Со склада
Февраль	Ель	39	138	4,9	0,75	8,8	1,29	Со склада
Март	Ель	40	156	5,9	0,89	10	1,44	Со склада
Апрель	Ель	25	170	4,2	0,8	6,8	1,27	Со склада
Май	Сосна	9	203	5,2	1,69	7,9	2,48	С воды
Июнь	Сосна	40	284	2	0,31	2,8	0,42	С воды
Июль	Сосна	40	300	4,2	0,63	5,6	0,84	С воды
Август	Сосна	35	270	3,9	0,63	5,4	0,86	С воды
Сентябрь	Сосна	40	300	4,4	0,67	5,9	0,9	С воды
Октябрь	Сосна	40	300	5	0,75	6,8	1	С воды
Май	Ель	10	194	6,2	1,88	9,6	2,79	С воды
Июнь	Ель	40	212	4,2	0,63	4,1	0,92	С воды
Июль	Ель	30	257	4,2	0,72	5,9	1,01	С воды
Август	Ель	35	222	4,4	0,72	6,6	1,02	С воды
Сентябрь	Ель	44	244	4,4	0,63	6,4	0,9	С воды
Октябрь	Ель	45	233	4,6	0,65	6,6	0,92	С воды

После пересчёта абсолютной влажности в относительную получим следующие сведения о влажности отходов окорки ели и сосны (данные представлены в таблице 5).

Таблица 5. Относительная влажность отходов окорки древесины (The relative humidity of the waste wood debarking)

Со склада			С воды		
Месяц	Древесина	Влажность	Месяц	Древесина	Влажность
Ноябрь	Сосны	72	Май	Сосны	67
Декабрь	Сосны	67	Июнь	Сосны	74
Январь	Сосны	68	Июль	Сосны	75
Февраль	Сосны	69	Август	Сосны	73
Март	Сосны	70	Сентябрь	Сосны	75
Апрель	Сосны	65	Октябрь	Сосны	75
Ноябрь	Ели	68	Май	Ели	66
Декабрь	Ели	63	Июнь	Ели	68
Январь	Ели	62	Июль	Ели	72
Февраль	Ели	58	Август	Ели	69
Март	Ели	61	Сентябрь	Ели	71
Апрель	Ели	63	Октябрь	Ели	70

Проиллюстрируем данные таблицы 5 графиками (рисунки 6, 7).

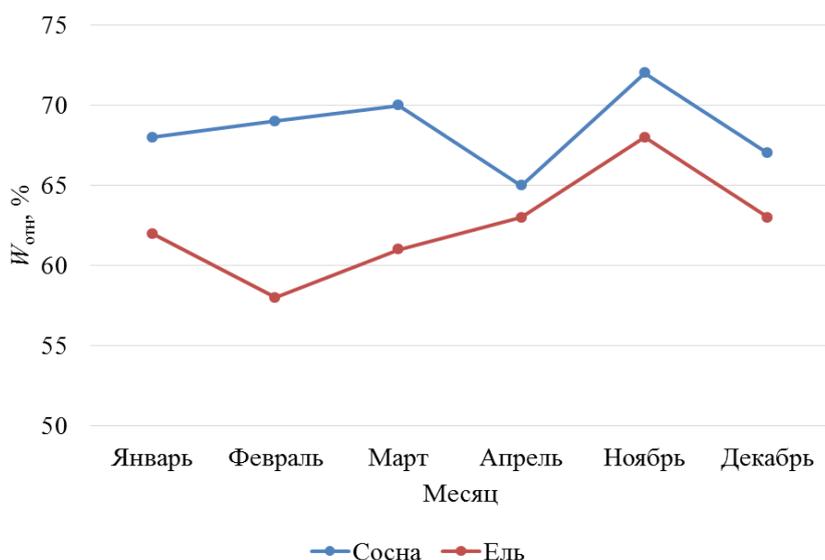


Рисунок 6. Относительная влажность отходов окорки со склада (The relative humidity of the waste debarking warehouse)

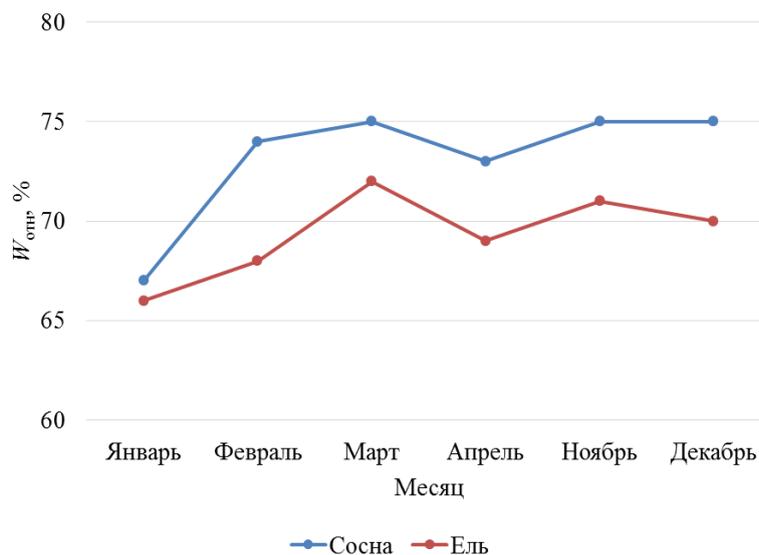


Рисунок 7. Относительная влажность отходов окорки с воды (Relative humidity of debarking waste from water)

По графикам и таблице 5 можем заключить, что в наших экспериментальных исследованиях следует ориентироваться на материал с относительной влажностью 55—75 %.

Заметим, что кора составляет значительную долю отходов лесопереработки. В доказательство этого в таблице 6 приведём средние величины объёмного содержания коры на древесине и вес 1 пл. м³ коры.

Таблица 6. Средние величины объёмного содержания коры на древесине и вес 1 пл. м³ коры [2], [7] (The average values of the volume content of bark on the wood and the weight of 1 sq. m³ cortex)

Породы древесины (балансы)	Объёмное содержание коры от объёма древесины, %	Вес 1 пл. м ³ коры (абсолютно сухой), кг
Ель	9,5	280
Сосна	11	334
Лиственница	18	418

В таблице 7 приведено количество коры на сплавной и свежесрубленной древесине по работе [8].

Данные таблицы показывают, что механические свойства коры на порядок ниже аналогичных свойств древесины [10—12]. Механические свойства коры ели снижаются по мере увеличения влажности.

Данные таблицы 9 дают представление об изменении механических свойств коры в зависимости от температуры [2].

Таблица 7. Количество коры на 1 пл. м³ древесины [8] (The amount of bark in 1. m³ wood)

Порода древесины	W, %	Количество коры, снятой с 1 пл. м ³ древесины	
		кг	скл. м ³
Ель			
Сплавная	80—83	120	0,20
Сплавная	55—60	55	0,19
Несплавная	48—50	65	0,26
Несплавная	12—15	32	0,25
Сосна			
Сплавная	80—82	132	0,26
Сплавная	55—60	75	0,25
Несплавная	55—60	78	0,28
Несплавная	12—15	36	0,27

В таблице 8 приведены результаты определения некоторых показателей механических свойств коры сосны и ели [2], [9] при влажности 10 %.

При понижении температуры прочность коры увеличивается, что видно из данных таблицы 9.

Можно отметить, что механические свойства коры исследованы сравнительно мало, поэтому основные выводы следующие.

Разработанные способы использования коры принято разделять на четыре группы:

- сжигание коры для получения тепловой или электрической энергии [13—16];
- механическая переработка коры на строительные и изоляционные материалы [17—19];
- химическая переработка коры для получения экстрактов и химикатов [20], [21];
- биологическая переработка коры для приготовления компостов [22], [23].

Кроме того, известно, что кора является эффективным сорбентом нефтепродуктов при ликвидации разливов [24], [25].

Таблица 8. Механические свойства коры (The mechanical properties of the crust)

Свойства коры	Порода древесины						
	Сосна	Ель	Лиственница	Пихта сибирская	Дуб	Берёза	Осина
Влажность, %	10	10	10	10	9	13	9
Плотность, кг/м ³							
Средняя	370	310	380	470	480	770	590
Предел колебаний	296—445	264—356	294—488	386—525	455—511	712—827	541—675
Водопоглощение (через 50 дней), %	203	140	149	—	117	63	95
Сопротивление сжатию в радиальном направлении, МПа							
Среднее	6,4	4,2	3,9	4,0	18,2	20,0	12,5
Предел колебаний	4,5—7,9	3,7—4,8	2,2—4,9	2,4—5,8	16,2—21,0	15,7—22,7	9,2—17,3
Сопротивление растягиванию, МПа							
Среднее	1,8	2,6	1,7	2,4	5,2	2,2	10,7
Предел колебаний	1,0—2,0	1,8—3,7	1,0—2,1	1,8—3,0	2,9—6,3	2,0—2,5	9,9—12,0
Твёрдость статическая, 0,01 Н/см ²							
Средняя	36	17	135	36	167	268	82
Предел колебаний	28—46	15—22	17—162	29—41	136—194	180—340	79—85
Твёрдость динамическая, 0,01 Н/мм ²							
Средняя	—	—	595	—	742	1236	809
Предел колебаний	—	—	505—760	—	629—870	975—1407	667—887

Таблица 9. Механические свойства коры в зависимости от температуры [2] (The mechanical properties of the crust depending on the temperature)

Порода	Температура, °С				
	0	-6	-11	-14—15	-20
Условный предел прочности при сжатии в радиальном направлении, МПа					
Ель	2,49	2,86	3,95	0	0
Берёза	3,64	4	4	0	0
Осина	1,57	4,59	5,16	0	0
Предел прочности при скалывании вдоль волокон, МПа					
Ель	0,7	0	3,03	3,01	0
Берёза	1,3	0	2,3	2,74	0
Осина	1,12	0	1,97	2,46	0
Предел прочности при скалывании поперёк волокон, МПа					
Ель	0,41	1	1,52	1,84	1,73
Берёза	1,2	1,46	1,92	1,92	1,97
Осина	0,78	0,95	1,22	1,36	1,56
Предел прочности при перерезании поперёк волокон, МПа					
Ель	4,4	4,69	4,72	5,67	0
Берёза	2,61	3,26	3,17	5,45	0
Осина	4,09	4,43	3,6	4,55	0

Очевидным и наиболее доступным способом утилизации древесной коры является энергетический способ — использование коры в качестве топлива.

Для расчёта рабочей теплотворной способности коры (т. е. низшей теплоты сгорания — без учёта теплоты, образующейся при конденсации водяных паров) воспользуемся формулой Д. И. Менделеева [26]:

$$Q_H = 339C + 1031H - 109O - 25W_{OTH}, \quad (1)$$

где C — процентное содержание углерода в коре по массе, H — процентное содержание водорода, O — процентное содержание кислорода, W_{OTH} — относительная влажность коры.

$$Q_H = -0,2119W_{OTH} + 18,695. \quad (2)$$

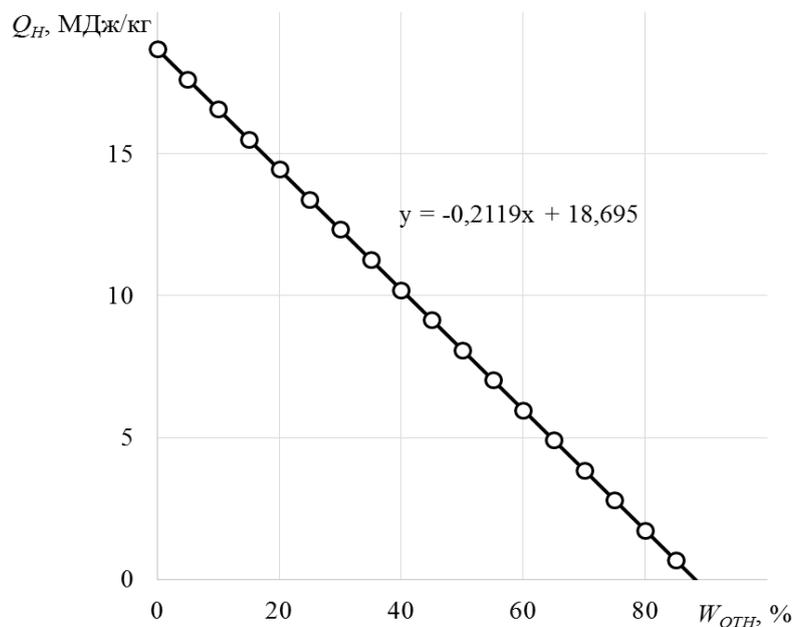


Рисунок 8. Рабочая теплотворная способность коры в зависимости от относительной влажности (Working calorific value of bark depending on relative humidity)

В пересчёте на абсолютную влажность зависимость рабочей теплотворной способности коры примет вид графика на рисунке 9.

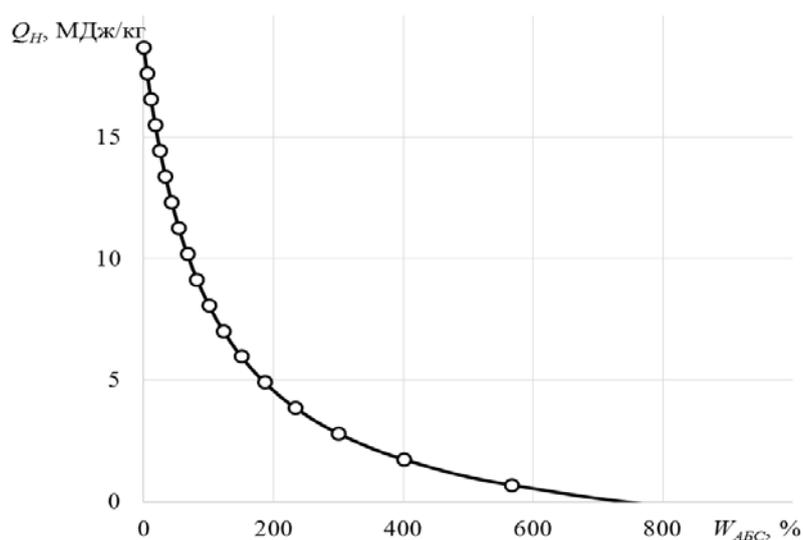


Рисунок 9. Рабочая теплотворная способность коры в зависимости от абсолютной влажности (Working calorific value of bark depending on absolute humidity)

Принято выделять:

- прямое сжигание коры, например, на целлюлозно-бумажных предприятиях, где кору сжигают в специальных котлоагрегатах высокой производительности (как правило, в смеси с другими видами топлива, например, щепой, углём или жидким топливом);
- сжигание брикетированной коры.

Важно отметить, что, помимо влажности сырья, на качество и прочность получаемых брикетов влияет фракционный состав сырья [15]. Это наглядно показывает график (рисунок 10).

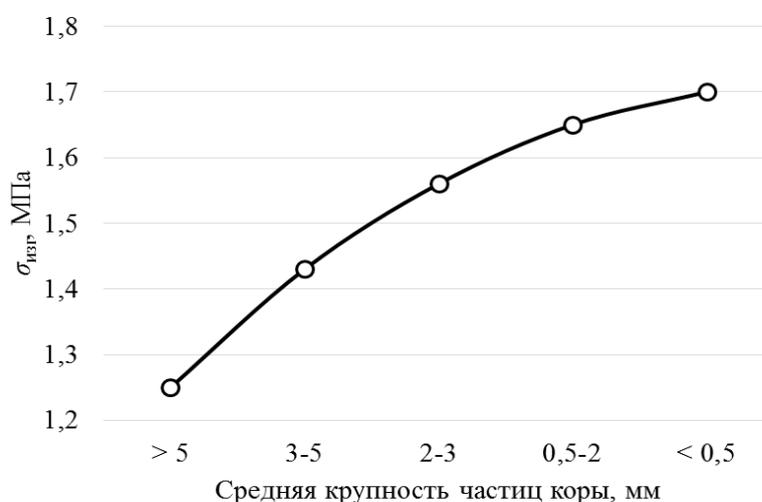


Рисунок 10. Влияние фракции древесной коры на механическую прочность брикетов
(Influence of wood bark fraction on the mechanical strength of briquettes)

График на рисунке 11 также показывает, что включение частиц древесины крупного размера резко снижает прочность брикетов [15].

На основании этих сведений рекомендуется брикетировать кору крупностью не более 5 мм, при наличии большого количества отходов фракцией более 5 мм сырье перед брикетированием необходимо измельчать.

То же самое можно отметить и для случая производства плитных материалов из коры. В таблице 10 представлены сведения, показывающие, как снижается прочность прессованных плит при включении крупных частиц коры [1].

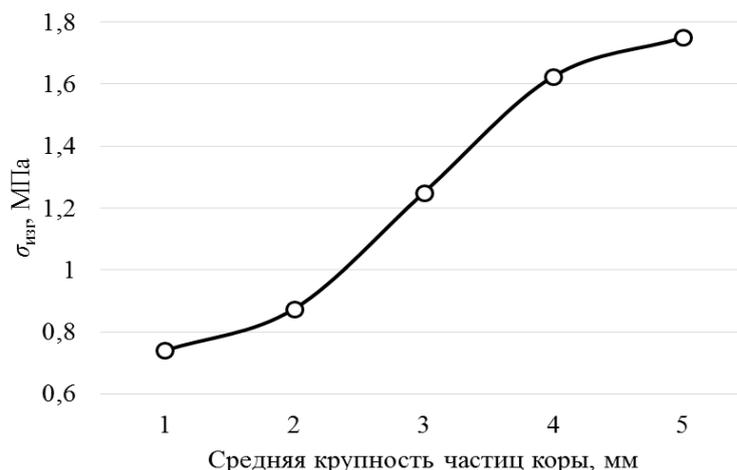


Рисунок 11. Влияние фракционного состава на механическую прочность брикетов при прессовании на штемпельном прессе: 1 — щепа 100 %; 2 — щепа 75 %, стружка и опилки 25 %; 3 — щепа 50 %, стружка и опилки 50 %; 4 — щепа 33 %, стружка и опилки 67 %; 5 — щепа 25 %, стружка и опилки 75 %; 6 — стружка и опилки 100 % (Effect of fractional composition on the mechanical strength of briquettes during pressing on the stamp press: 1 — chips 100 %; 2 — chips 75 %, chips and sawdust — 25 %; 3 — chips 50 %, chips and sawdust 50 %; 4 — chips 33 %, chips and sawdust 67 %; 5 — chips 25 %, chips and sawdust 75 %; 6 — chips and sawdust 100 %)

Таблица 10. Фракционный состав измельчённой коры для наружных и средних слоёв плит [1] (Fractional composition of crushed bark for outer and middle layers of plates)

Размер частиц фракции, мм	Фракционный состав измельчённой коры		
	ели		сосны
	для наружных слоёв, % по весу	для среднего слоя, % по весу	для наружных слоёв, % по весу
8,0	0	1,0	0
6,5	0	10,5	0
5,0	0	14,9	0
4,0	0	14,3	0
3,0	0	13,4	0
2,0	7,5	15,9	3,4
1,0	29,5	20,4	31,2
< 1,0	65,4	7,8	65,0

Для измельчения коры применяются различные типы корорубок, а также молотковые мельницы-дробилки [27]. Типы рабочих органов машин, применяющихся для измельчения отходов деревопереработки, представлены схемой (рисунок 12).

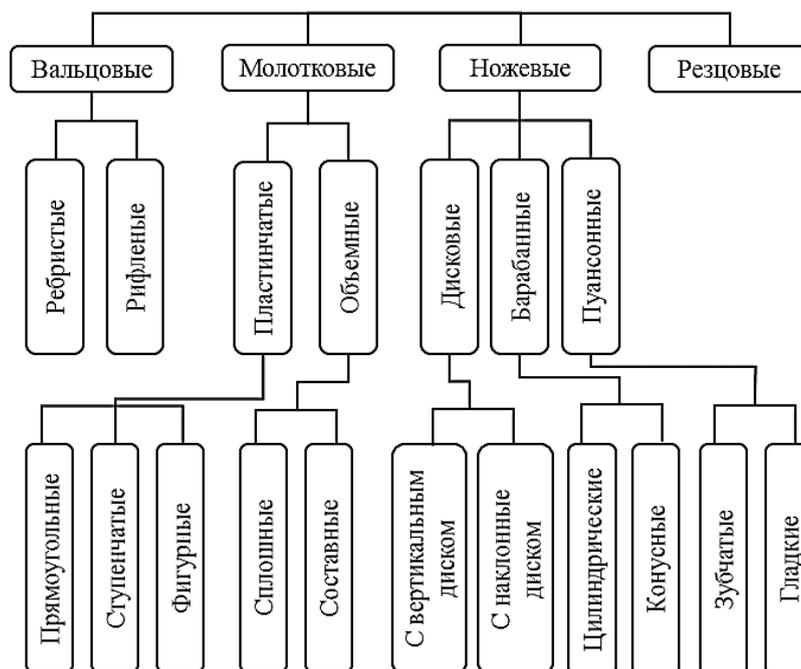


Рисунок 12. Типы рабочих органов измельчителей древесных отходов [27] (Types of working bodies of wood waste shredders)

В таблице 11 приводится краткое описание и принцип работы рабочих органов измельчителей, предназначенных для разных видов древесных отходов.

Наиболее распространёнными являются машины для измельчения коры с ножевым пуансонным рабочим органом. Корорубки конструктивно выполняются по двум схемам — одновальные и двухвальные с встречным направлением вращения. Принципиальные схемы корорубок по работе [1] представлены на рисунке 13.

Таблица 11. Краткое описание и принцип работы рабочих органов измельчителей древесных отходов (Brief description and principle of work of working bodies of wood waste shredders)

Тип рабочих органов	Подкласс	Принцип работы, краткое описание
Вальцовые	Рифлёные	Рифлёные вальцы представляют собой барабан цилиндрической формы, на поверхности которого имеются рифли. Рифлёные вальцы можно использовать для тонкого измельчения древесных отходов небольшого диаметра. Наиболее существенным недостатком является налипание измельчаемой массы на рифли, что приводит к резкому ухудшению процесса измельчения, требуется остановка машины и очистка вальцов
	Ребристые	Ребристые вальцовые рабочие органы представляют собой набор дисков, в пазы которых вставляются и крепятся ножи, расположенные параллельно оси вращения вальца. Данные рабочие органы осуществляют измельчение древесных отходов неограниченной длины на маломерные отрезки длиной 120—160 мм, диаметр перерабатываемых отходов до 150 мм. К недостаткам следует отнести размер получаемых отрезков, которые при дальнейшей переработке в кормовых целях необходимо доизмельчать
Резцовые	—	Представляют собой вращающийся резец, закреплённый в оправке, к которому подаётся измельчаемый материал. В основном машины, в которых используются резцовые рабочие органы, предназначены для переработки деловой древесины, с целью получения древесного шпона и технологической щепы
Ножевые	Пуансонные	Пуансонные рабочие органы представляют собой набор вращающихся и неподвижных ножей. Измельчение происходит путём перерезания измельчаемой массы подвижным ножом при попадании её на два неподвижных ножа
	Рубильные: дисковые и барабанные	При использовании рубильных рабочих органов для измельчения деловой древесины и отходов из неё получается кондиционная технологическая щепка, используемая в гидролизном и бумажном производстве для получения ДСП, ДВП и других строительных материалов. Существенным недостатком рубильных рабочих органов является их частая поломка и затупление
Молотковые	Пластинчатые, объёмные	Представляют собой ротор с шарнирно закреплёнными молотками пластинчатой или объёмной формы. Пластинчатые молотки могут быть прямоугольными, ступенчатыми и фигурными, объёмные — сплошными и составными. В основном молотковые рабочие органы применяются в сельском хозяйстве для измельчения зерна, грубых кормов, комбикормов

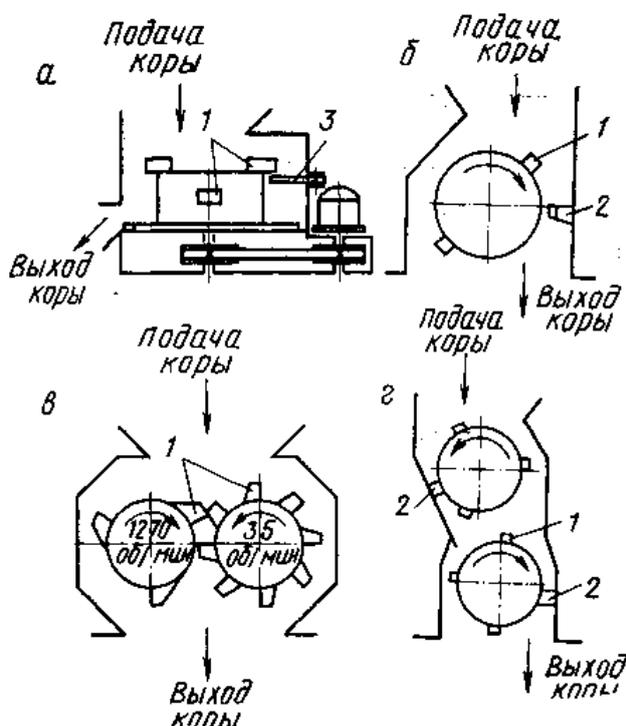


Рисунок 13. Принципиальные схемы работы корорубок: *а* — однороторная корорубка с вертикально расположенным ротором; *б* — однороторная корорубка с горизонтально расположенным ротором; *в* — двухроторная корорубка с горизонтальным расположением роторов; *г* — двухроторная корорубка с вертикальным расположением роторов; 1 — нож, жёстко закреплённый на корпусе; 2 — контрнож, жёстко закреплённый на корпусе; 3 — контрнож, эластично закреплённый на корпусе (Schematic diagrams of the boxes: *a* — single box with a vertically mounted rotor; *б* — single box with a horizontal rotor; *в* — twin-rotor korobovka with the horizontal arrangement of the rotors; *г* — korobovka the twin-rotor with a vertical rotor; 1 — knife, rigidly secured to the housing; 2 — anvil rigidly fixed to a casing; 3 — anvil, elastically secured to the housing)

Одновальные роторные корорубки с вертикально расположенным ротором измельчают кору между жёстко закреплёнными на роторе ножами и тремя эластично закреплёнными на корпусе контрножами [1].

В одновальных роторных корорубках с горизонтально расположенным ротором кора измельчается между ножами, закреплёнными на роторе, и контрножом, закреплённым на корпусе. Из отечественных конструкций одновальных роторных корорубок наиболее удачной считалась корорубка КР-6, состоящая из сварной рамы, корпуса, в котором вращается ротор, и электродвигателя, соединённого с валом редуктора муфтой. Корорубки

КР-2, ЦР-02, КРН-1/7, КРН-1/15, КРН-1/25 в конструктивном исполнении аналогичны корорубке КР-6. Отличие заключается в длине ротора и количестве дисков [1]. Наружной поверхности дисков придана форма двух-трёх или четырёхрезцовых фрез, режущие кромки которых упрочнены.

Двухвальные роторные корорубки с расположением ротора в вертикальной плоскости состоят из двух однороторных корорубок, расположенных одна над другой и заключённых в один корпус. Кора после измельчения на роторе первой ступени попадает на ротор второй ступени. Дополнительное измельчение коры на роторе второй ступени достигается путём уменьшения ширины ножа и увеличения количества ножей на диске. Представителями таких корорубок являются отечественные корорубки КРН-2/25, КРС-68, спроектированные Ижевским заводом тяжёлых бумагоделательных машин, Ц6-01.

Технические характеристики ранее выпускавшихся отечественных корорубок приведены в таблице 12.

В настоящее время на рынке представлены две отечественные модели корорубок: одновальные КР12-9М и КР8-6, их технические характеристики и данные о производительности представлены в таблице 13.

Недостатком этих измельчителей является их высокая энергоёмкость, низкая производительность, необходимость предварительного измельчения массы, частая поломка ножей при попадании минеральных включений. Особо важна влажность отходов, подающихся на измельчение [1].

Тем не менее подобное оборудование до сих пор распространено на предприятиях, занимающихся переработкой отходов лесозаготовительного производства.

Ряд этих недостатков удалось устранить зарубежным производителям, оборудование которых отличается большей надёжностью.

В нашем исследовании опыты будут проведены на импортном промышленном измельчителе Erdwich, принцип работы которого аналогичен описанному выше.

3. Результаты

Анализ литературных источников по теме исследования показал, что вопрос измельчения отходов окорки проработан слабо. Сведём основные сведения, относящиеся к современным работам по измельчению древесного сырья, в таблицу 14.

Анализируя результаты теоретических и экспериментальных исследований по проблематике измельчения древесных материалов, можем отметить, что вопрос измельчения отходов окорки на оборудовании с ножевыми рабочими органами проработан сравнительно мало.

Таблица 12. Технические характеристики отечественных корорубок (Technical characteristics of domestic boxes)

Показатели	КР-6	ЦР-02	КРН1/7	КРН1/15	КРН1/25	КР2	КРН2/25	
							Ротор первой ступени	Ротор второй ступени
Производительность, т/ч.	6	15	7	15	25	2	25	25
Количество дисков, шт.	17	9	9	20	33	15	33	40
Диаметр окружности резания, мм (большой/малый)	540	320	600	600	500	320	600	600
	480	220	570	570	570	290	570	570
Размеры ножа (ширина/высота), мм/мм	30 × 40	70 × 50	33 × 44	33 × 44	30 × 36	30 × 44	30 × 44	30 × 36
Количество ножей на дисках, шт.	2	1	3	3	3	3	4	3
Углы ножа, град. (передний/задний)	-10	10	10	10	10	10	10	10
	0	8	15	15	0	0	6	6
Число оборотов ротора в минуту	980	600-1000	1010	1010	1010	980	980	980
Мощность привода, кВт	40	75	40	50	75	20	75	75

Таблица 13. Технические характеристики отечественных корорубок КР12-9М и КР8-6
(Technical characteristics of the domestic corroboc CU MICR 12-9 8-6)

Модель	КР12-9М	КР8-6
Производительность, нас. м ³ /ч.	100	60
Частота вращения ротора, об./мин.	770	940
Рабочая длина ротора, м	0,9	0,6
Количество ножей, шт.	9	6
Установленная мощность, кВт	163	93
Габаритные размеры, мм	3640 × 1800 × 2080	3025 × 1503 × 1510
Масса, т	~ 14830	~ 7200

4. Обсуждение и заключение

Анализируя результаты теоретических и экспериментальных исследований по проблематике измельчения древесных материалов, можем отметить, что вопрос измельчения отходов окорки на оборудовании с ножевыми рабочими органами проработан сравнительно мало.

Наиболее распространёнными являются машины для измельчения коры с ножевым рабочим органом, в связи с чем в нашем исследовании опыты будут проведены на импортном промышленном измельчителе Erdwich, с пуансонным ножевым рабочим органом.

Распределение отходов окорки по крупности практически повторяет закон равной плотности. В исследованиях предстоит ориентироваться на измельчение материала со средней крупностью до 50 мм, представленного кусками коры и отщепом древесины в соотношении 9:1, с относительной влажностью, достигающей 55—75 %.

Благодарности

Работа выполнена в рамках научной школы Якутской государственной сельскохозяйственной академии «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства», возглавляемой доктором технических наук, профессором Григорьевым Игорем Владиславовичем. Авторы выражают благодарность И. В. Григорьеву за эффективную деятельность по созданию коллективов единомышленников для решения актуальных задач лесопромышленного комплекса.

Таблица 14. Основные научные результаты, представленные в исследованиях по тематике измельчения древесного сырья (The main scientific results presented in research on the subject of grinding of wood raw materials)

Источник	Область исследования	Основные результаты
[27]	Измельчение коры молотковыми рабочими органами	Предложена математическая модель процесса измельчения древесной коры с использованием молотковой дробилки. Основное внимание сосредоточено на теоретическом описании процесса взаимодействия отрезка коры и инструмента, определении усилий и напряжения в зоне контакта коры и рабочего органа — молотка
[28]	Измельчение цельной древесины рубильными рабочими органами	Теоретически и экспериментально определены качественные и количественные показатели процесса взаимодействия реза с древесиной разных пород с учётом кинематики резания, разработана методика построения многолезцовых рабочих органов, учитывающая особенности формы и размеров сечения древесины, условия получения щепы и позволяющая прогнозировать и обосновывать перспективные конструкции рубильных машин
[29]	Рубка древесины в кондиционную щепу	Разработаны и исследованы математические модели измельчения и доизмельчения древесины, включая формирование её структуры с учётом полимерных и физико-механических свойств древесины, позволяющие оптимизировать технологические процессы с целью максимального получения кондиционной продукции при минимальных затратах и потере древесной массы
[30]	Безножевое измельчение древесины	Исследованы безожевые способы измельчения древесины. Показано, что способ измельчения древесного сырья оказывает существенное влияние на вид, форму, структуру, физико-механические и адсорбционные свойства получаемых древесных частиц
[31]	Доизмельчение кусковых видов сырья и крупной щепы	Обоснованы направления совершенствования процесса переработки и доизмельчения кусковых видов сырья и крупной щепы. В частности, разработана математическая модель, позволяющая установить параметры работы дезинтеграторов дискового и барабанного типов, влияющие на качество доизмельчения крупной щепы, и определить оптимальные режимы подачи и измельчения крупных древесных частиц
[32]	Измельчение сучьев валковой дробилкой	Выполнены теоретические и экспериментальные исследования процесса измельчения сучьев дисками и параллельными ножами путём резания и излома. Результаты исследований позволяют обосновать геометрические параметры рабочих органов и силовые параметры валковой дробилки, обеспечивающей получение отрезков заданной длины

Список литературы

1. *Веретенник, Д. Г.* Использование древесной коры в народном хозяйстве / Д. Г. Веретенник. — Москва : Лесная пром-сть, 1976. — 120 с.
2. *Цывин, М. М.* Использование древесной коры / М. М. Цывин. — Москва : Лесная пром-сть, 1973. — 96 с.
3. *Газизов, А. М.* Моделирование процесса разрушения коры при роторной окорке древесины / А. М. Газизов В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. — 2008. — № 5. — С. 271—279.
4. *Газизов, А. М.* Влияние влажности на развитие процесса разрушения коры при роторной окорке / А. М. Газизов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. — 2008. — Вып. 6 (63). — С. 129—133.
5. *Орлова, И. В.* Экономико-математические методы и модели: компьютерное моделирование : учеб. пособие / И. В. Орлова. — Москва : ИНФРА-М, 2010. — 366 с.
6. *Газизов, А. М.* Вариационный метод расчёта и стабилизации параметров роторной окорки / А. М. Газизов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев // Справочник. Инженерный журнал. — 2009. — № 7. — С. 47—51.
7. *Газизов, А. М.* Влияние строения и состояния коры на параметры процесса селективной окорки / А. М. Газизов, И. В. Григорьев, Д. А. Ильюшенко // Материалы международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса». — Вологда : ВоГТУ, 2009. — С. 82—84.
8. *Житков, А. В.* Утилизация древесной коры / А. В. Житков. — Москва : Лесная пром-сть, 1985. — 136 с.
9. *Газизов, А. М.* Анализ современных методик расчёта основных параметров окорки режущим инструментом и пути их уточнения / А. М. Газизов, В. Я. Шапиро, И. В. Григорьев // Сборник трудов международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы лесного комплекса» / под общ. ред. А. Я. Панфилова. — Брянск, 2008. — Вып. 21. — С. 231—235.
10. *Уголев, Б. Н.* Древесиноведение и лесное товароведение / Б. Н. Уголев. — Москва : Издательский центр «Академия», 2006. — 272 с.
11. *Ашкенази, Е. К.* Анизотропия конструкционных материалов : справочник / Е. К. Ашкенази, Э. В. Ганов. — Ленинград : Машиностроение, 1980. — 247 с.
12. *Григорьев, И. В.* Перспективные технические решения повышения эффективности групповой окорки лесоматериалов / И. В. Григорьев, Б. М. Локштанов, А. Е. Гулько // Материалы международной научно-технической конференции, посвящённой 60-летию Лесоинженерного факультета Петрозаводского государственного университета «Опыт лесопользования в условиях Северо-Запада РФ и Фенноскандии». — Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2011. — С. 10—11.
13. *Бажанов, Е. А.* Брикетирование древесных отходов / Е. А. Бажанов // Деревообрабатывающая промышленность. — 1996. — № 4. — С. 16—18.
14. *Веселов, А. А.* Использование древесных отходов фанерного и спичечного производства / А. А. Веселов. — Москва : Лесная пром-сть, 1987. — 160 с.
15. *Модин, Н. А.* Брикетирование измельчённой древесины и древесной коры / Н. А. Модин, А. Н. Ерошкин. — Москва : Лесная пром-сть, 1971. — 112 с.
16. *Куницкая, О. А.* Уплотнение древесных материалов под действием ударной нагрузки / О. А. Куницкая, Е. Г. Хитров, Д. А. Ильюшенко // Научное обозрение. — 2014. — № 4. — С. 121—127.

17. *Коробов, В. В.* Переработка низкокачественного древесного сырья (проблемы безотходной технологии) / В. В. Коробов, Н. П. Рушнов. — Москва : Экология, 1991. — 288 с.
18. *Куницкая, О. А.* Материаловедческие и технологические аспекты производства новых конструкционных и защитных материалов на основе древесины путём её пропитки жидкостями с различными физико-химическими и биологическими свойствами / О. А. Куницкая. — Деп. в ВИНТИ 290.04.11 № 202-В2011, 2011. — 35 с.
19. *Куницкая, О. А.* Новые материалы из низкотоварной древесины и изделия из них // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-практической конференции / О. А. Куницкая, И. В. Григорьев. — Воронеж : ВГЛТА, 2014. — Т. 2. — С. 22—26.
20. *Левданский, В. А.* Ценные химические продукты из древесной коры / В. А. Левданский, Б. Н. Кузнецов // Достижения науки и техники — развитию г. Красноярска : тез. докл. научно-практической конференции. — Красноярск, 1999. — С. 164—165.
21. *Левин, Э. Д.* Комплексная переработка лиственницы / Э. Д. Левин, О. Б. Денисов, Р. З. Пен. — Москва : Лесная пром-сть, 1987. — 224 с.
22. *Щукина, А. В.* Влияние короцеолитовых удобрений на урожайность картофеля и пшеницы / А. В. Щукина, Р. А. Степень // Вестник СибГТУ. — 2005. — № 1. — С. 43—46.
23. *Щукина, А. В.* Получение и применение компостов на основе коры пихты сибирской / А. В. Щукина, Р. А. Степень // Региональные производители. Их место на рынке товаров и услуг, 2005. — С. 207—210.
24. *Ивкина, Т. М.* Оптимизация сорбции разливов нефти измельчённой корой лиственницы сибирской / Т. М. Ивкина, Э. Д. Левин // Изв. вузов — Лесной журнал. — 1984. — № 5. — С. 80—83.
25. *Куницкая, О. А.* Влияние разливов горюче-смазочных материалов при лесозаготовительных работах на окружающую среду / О. А. Куницкая, Я. А. Щетнева // Леспроминформ. — 2016. — № 4 (118). — С. 54—58.
26. *Чибирев, О. В.* Аппроксимированные зависимости для расчёта теплотворной способности коры по абсолютной влажности / О. В. Чибирев, Ю. Н. Власов, Д. В. Бастриков // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. — 2016. — Т. 4, № 1 (21). — С. 108—111.
27. *Ефимова, Е. В.* Измельчение древесной коры на оборудовании с молотковыми рабочими органами : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ефимова Е. В. — Санкт-Петербург : СПбГЛТУ, 2013. — 19 с.
28. *Гомонай, М. В.* Ресурсосберегающие технологии измельчения древесины на щепу в рубильных машинах с многолезцовыми и ножевыми рабочими органами : дис. ... д-ра техн. наук / Гомонай М. В. — Воронеж : ВГЛТА, 2003. — 413 с.
29. *Васильев, С. Б.* Обоснование технологии и оборудования производства щепы при неистощительном лесопользовании : дис. ... д-ра техн. наук / Васильев С. Б. — Петрозаводск, 2002. — 342 с.
30. *Сотонин, Н. Я.* Процесс дробления сучьев валковой дробилкой и обоснование основных параметров её рабочего органа / Н. Я. Сотонин. — Свердловск, 1984. — 207 с.
31. *Жуков, М. В.* Обоснование технологии и режимов переработки вторичных древесных ресурсов с целью повышения качества щепы : дис. ... канд. техн. наук / Жуков М. В. — Петрозаводск, 2002. — 208 с.

32. *Симонова, И. В.* Обоснование геометрических параметров формы рабочей поверхности диска и ножей рубительной машины / И. В. Симонова. — Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2007. — 117 с.

References

1. *Veretennik, D. G.* The use of bark in the national economy / D. G. Veretennik. — Moscow : Forest industry, 1976. — 120 p.
2. *Tsyvin, M. M.* The use of wood bark / M. M. Tsyvin. — Moscow : Forest industry, 1973. — 96 p.
3. *Gazizov, A. M.* Simulation Of the process of destruction of the bark of the rotary debarking of wood / A. M. Gazizov, V. Ya. Shapiro, I. V. Grigorev // Vestnik Krasnoyarsk state agrarian University. — 2008. — No. 5. — P. 271—279.
4. *Gazizov, A. M.* the Effect of humidity on the development of the process of destruction of the cortex in a rotary debarking / A. M. Gazizov, V. Ya. Shapiro, I. V. Grigorev // Vestnik of the Moscow state forest University — Forest Herald. — 2008. — Vol. 6 (63). — P. 129—133.
5. *Orlova, I. V.* Economic and mathematical methods and models: computer modeling: textbook / I. V. Orlova. — Moscow : INFRA-M, 2010. — 366 s.
6. *Gazizov, A. M.* Variational method of calculation and stabilization of parameters of rotary debarking / A. M. Gazizov, V. Ya. Shapiro, I. V. Grigorev // Directory. Engineering journal. — 2009. — No. 7. — P. 47—51.
7. *Gazizov, A. M.* Influence of structure and condition of the bark on the parameters of the process of selective debarking / A. M. Gazizov, I. V. Grigorev, D. A. Ilyushenko // Materials of international scientific-technical conference «Actual problems of development of forestry complex». — Vologda : Vogtu, 2009. — P. 82—84.
8. *Zhitkov, A. V.* Disposal of tree bark / A. V. Zhitkov. — Moscow : Forest industry, 1985. — 136 p.
9. *Gazizov, A. M.* Analysis of modern methods of calculation of main parameters of debarking cutting tool and ways to improve / A. M. Gazizov, V. Ya. Shapiro, I. V. Grigorev // Proceedings of the international scientific-practical conference «Actual problems of forestry complex» under the General editorship of A. I. Panfilov. — Bryansk, 2008. — Vol. 21. — P. 231—235.
10. *Ugolev, B. N.* Drivelinemedia and forest commodity / B. N. Ugolev. — Moscow : Publishing center «Akademiya», 2006. — 272 p.
11. *Ashkenazi, E. K.* Anisotropy of structural materials: Handbook / E. K. Ashkenazi, E. V. Ganov. — Leningrad : Mashinostroenie, 1980. — 247 p.
12. *Grigorev, I. V.* Promising technical solutions for improving the efficiency of group debarking / I. V. Grigorev, B. M. Lokshtanov, A. E. Gulko // Materials of the international scientific and technical conference dedicated to the 60th anniversary of the faculty of forest Engineering of the Petrozavodsk state University «Experience of forest use in the North-West of the Russian Federation and Fennoscandia». — Petrozavodsk : Izd-vo Petrozavodsk state University, 2011. — P. 10—11.
13. *Bazhanov, E. E.* Briquetting of wood waste / E. A. Bazhanov // Woodworking industry. — 1996. — No. 4. — P. 16—18.
14. *Veselov, A. A.* The Use of wood waste, and the use of wood-based production / A. A. Veselov. — Moscow : Forest industry, 1987. — 160 p.

15. *Modin, N. A.* Briquetting of crushed wood and bark / N. A. Modin, A. N. Eroshkin. — Moscow : Forest industry, 1971. — 112 p.
16. *Kunitskaya, O. A.* Seal wood materials under the action of shock loads / O. A. Kunitskaya, E. G. Khitrov, D. A. Ilyushenko // Scientific obozrenie. — 2014. — No. 4. — P. 121—127.
17. *Korobov, V. V.* Processing of low-quality wood raw materials (problems of waste-free technology) / V. V. Korobov, N. P. Rasnov. — Moscow : Ecology, 1991. — 288 p.
18. *Kunitskaya, O. A.* Material and technological aspects of the production of new structural and protective materials on the basis of wood by impregnating it with various liquids with different physical and chemical and biological properties / O. A. Kunitskaya. — DEP. v VINITI 290.04.11 № 202-B2011, 2011. — 35 p.
19. *Kunitskaya, O. A.* new materials and products from low-grade wood // Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice. Collection of scientific works on the materials of the international scientific-practical conference / O. A. Kunitskaya, I. V. Grigorev. — Voronezh : VLTA, 2014. — Vol. 2. — P. 22—26.
20. *Levdansky, V. A.* Valuable chemical products from wood bark / V. A. Levdansky, B. N. Kuznetsov // Achievements of science and technology-development of Krasnoyarsk : proc. Doc. scientific.-prakt. Conf. — Krasnojarsk, 1999. — P. 164—165.
21. *Levin, E. D.* Complex processing of larch / E. D. Levin, O. Denisov, R. Z. Pen. — Moscow : Forest industry, 1987. — 224 p.
22. *Shchukina, A. V.* Influence of corozalito fertilizers on the yield of potatoes and wheat / V. A. Shchukina, R. A. Degree // Bulletin Of The Siberian State Technological University. — 2005. — No 1. — P. 43—46.
23. *Shchukina, A. V.* Preparation and application of compost on the basis of Siberian fir bark / V. A. Shchukina, R. A. Degree // Regional producers. Their place in the market of goods and services, 2005. — P. 207—210.
24. *Ivkina, T. M.* Optimization of oil spill sorption by crushed Siberian larch bark / T. M. Ivkina, E. D. Levin // Izv. higher educational. Lesn. journal. — 1984. — No. 5. — P. 80—83.
25. *Kunitskaya, O. A.* Effect of spills of fuel and lubricants during logging operations on the environment / O. A. Kunitskaya, J. A. Sedneva // LesPromInform. — 2016. — No. 4 (118). — P. 54—58.
26. *Chibirev, O. V.* Approximated dependences for calculating the calorific value of the crust by absolute humidity / O. V. Chibirev, Y. N. Vlasov, D. V. Bastrikov // Actual directions of scientific researches of XXI century: theory and practice. — 2016. — Vol. 4, No. 1 (21). — P. 108—111.
27. *Efimova, E. V.* Crushing of wood bark on the equipment with hammer working bodies. The author's abstract : dis. ... kand. tech. sciences' / Efimova E. V. — Sankt-Peterburg : Spbgltu, 2013. — 19 s.
28. *Gomani, M. V.* Resource-Saving technology of the crushing wood into chips in chipping machine with gang and knife tools a/m : dis. ... doc. tech. sciences' / Gomani M. V. — Voronezh : VGLTA, 2003. — 413 p.
29. *Vasilyev, S. B.* Justification of technology and equipment for the production of wood chips in the sustainable forest management : dis. ... doc. tech. sciences' / Vasilyev S. B. — Petrozavodsk, 2002. — 342 p.
30. *Sotonin, N. I.* The process of breaking twigs, a roller crusher and a substantiation of the basic parameters of the working body / N. I. Sotonin. — Sverdlovsk, 1984. — 207 p.
31. *Zhukov, M. V.* Justification of technology and modes of processing of secondary wood resources in order to improve the quality of chips : dis. ... kand. tech. sciences' / Zhukov M. V. — Petrozavodsk, 2002. — 208 p.

32. *Simonova, I. V.* Substantiation of geometrical parameters of the shape of the working surface of the disk and knives of the chipper / I. V. Simonova. — Petrozavodsk : Izd-vo Petrozavodsk State University, 2007. — 117 p.

© Бастриков Д. В., Куницкая О. А., 2018