

## Результаты экспериментальных исследований энергоёмкости рубки отходов окорки

Е.В. Нестерова<sup>1a</sup>, В.Е. Божбов<sup>1b</sup>, А.В. Калистратов<sup>1c</sup>, В.Е. Макаров<sup>2d</sup>,  
Н.О. Задраускайте<sup>3e</sup>, М.В. Степанищева<sup>4f</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,  
пер. Институтский, 5, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Поволжский государственный технологический университет, пл. Ленина, 3, Йошкар-Ола, Республика Марий Эл

<sup>3</sup> Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова,  
наб. Северной Двины, 17, Архангельск, Россия

<sup>4</sup> Братский государственный университет, ул. Макаренко, 40, Братск, Россия

<sup>a</sup> jenechka-72@mail.ru, <sup>b</sup> v-b@mail.ru, <sup>c</sup> shurik77@mail.ru, <sup>d</sup> ooo.mcps.13@mail.ru,

<sup>e</sup> e.n.zadrauskaite@narfu.ru, <sup>f</sup> marina01031977@inbox.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2765-5325>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0881-2911>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0009-0007-8344-8781>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2564-0832>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4248-7860>, <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4867-3901>

Статья поступила 27.04.2023, принята 05.05.2023

*Измельчение является одной из важнейших операций в цепочке утилизации отходов окорки. Ранее была изучена связь энергоёмкости измельчения коры древесины сосны и ели и степени ее измельчения с учетом влажности. Цель исследования — дальнейшее развитие научного описания энергоёмкости измельчения отходов окорки. В исследовании получены дополнительные экспериментальные сведения об энергоёмкости измельчения (рубки) коры древесины лиственницы, березы и осины. Экспериментальный материал получен на предприятии ООО «Листвин» (Ленинградская область). При проведении опытов использован ножевой промышленный измельчитель отходов Erdwich M600/1-400. В результате обработки экспериментальных данных установлено, что удельная работа измельчения достаточно точно рассчитывается на основе закона измельчения Бонда. Коэффициент пропорциональности в его выражении связан с плотностью коры и ее влажностью. Получена математическая модель, позволяющая оценить удельную энергоёмкость измельчения коры с учетом степени измельчения, ее влажности и плотности. Проверка математической модели показала ее адекватность экспериментальным данным (расчетное значение критерия Фишера составило 2,3679 при критическом значении 2,4772). Полученные результаты дополняют сведения об энергоёмкости рубки коры перед последующей переработкой и предлагаются для обоснования влажности, до которой предварительно следует высушивать отходы окорки перед подачей на измельчение, а также для оценки целесообразности их переработки в топливные брикеты по критерию энергетической себестоимости.*

**Ключевые слова:** ножевой рабочий орган; кора осины, березы, лиственницы; закон Бонда; степень измельчения.

## Results of experimental studies of debarking waste shredding energy consumption

E.V. Nesterova<sup>1a</sup>, V.E. Bozhbov<sup>1b</sup>, A.V. Kalistratov<sup>1c</sup>, V.E. Makarov<sup>2d</sup>,  
N.O. Zadrauskaite<sup>3e</sup>, M.V. Stepanishcheva<sup>4f</sup>

<sup>1</sup> St. Petersburg State Forest Engineering University named after S.M. Kirov; 5, Institutsky Ave., St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Volga State University of Technology; 3, Lenin Sq., Yoshkar-Ola, Republic of Mari El

<sup>3</sup> Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; 17, Severnoi Dviny Emb., Arkhangelsk, Russia

<sup>4</sup> Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia

<sup>a</sup> jenechka-72@mail.ru, <sup>b</sup> v-b@mail.ru, <sup>c</sup> shurik77@mail.ru, <sup>d</sup> ooo.mcps.13@mail.ru,

<sup>e</sup> e.n.zadrauskaite@narfu.ru, <sup>f</sup> marina01031977@inbox.ru

<sup>a</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2765-5325>, <sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0881-2911>, <sup>c</sup> <https://orcid.org/0009-0007-8344-8781>,

<sup>d</sup> <https://orcid.org/0000-0003-2564-0832>, <sup>e</sup> <https://orcid.org/0000-0002-4248-7860>, <sup>f</sup> <https://orcid.org/0000-0003-4867-3901>

Received 27.04.2023, accepted 05.05.2023

*Shredding operation is one of the most important operations in the debarking waste utilization process. The relationship between energy consumption and shredding ratio of pine and spruce bark was previously studied, taking into account the bark moisture content. The purpose of the study lays in further development of scientific description of energy consumption of debarking waste shredding. The study bases on additional experimental data on the energy consumption of larch, birch and aspen wood bark shredding. The experimental material was obtained at the Listvin LLC, (Leningrad region). During the experiments, Erdwich M600/1-400 industrial waste shredder was used. As a result of the processing of experimental data on the energy consumption of shredding the bark, it is found that*

the specific work of shredding is calculated quite accurately basing on the Bond's expression. The proportionality coefficient is related mainly to the density of the bark and its moisture content. Mathematical model is obtained, which makes possible to estimate the specific energy consumption of bark shredding, taking into account the shredding ration, the bark moisture content and it's density. The verification of the mathematical model shows its adequacy to the experimental data (the calculated value of the Fisher statistics is 2.3679 with a critical value of 2.4772). Obtained results complement information on the energy consumption of bark shredding before further processing and are offered to justify the moisture content to which the bark waste should be dried before being fed for shredding, as well as to assess the feasibility of the waste processing into fuel briquettes according to the criterion of energy cost.

**Keywords:** knife working body; aspen birch, larch, bark; Bond's relationship; shredding degree.

**Введение.** Изучение, разработка и обоснование способов утилизации отходов окорки является актуальной научно-практической задачей лесопромышленного комплекса [1; 2]. В большинстве случаев (исключая прямое сжигание) перед переработкой отходы необходимо измельчать [3–5]. Например, для производства топливных брикетов крупность частиц коры должна составлять ориентировочно 5 мм и менее [4]; для использования в сельском хозяйстве рекомендуется мульча крупностью 2–3 мм [3]; для производства композиционных плитных материалов и получения экстрактов используется еще более мелкое сырье с крупностью менее 1 мм [3]. Операция измельчения является одной из важнейших в цепочке утилизации отходов окорки [3; 6; 7].

Ранее была изучена связь энергоемкости измельчения коры и степени измельчения с учетом породы древесины и влажности, а также некоторых параметров ножевого рабочего органа измельчителя [8–20]. Зависимости для расчета энергоемкости измельчения коры используются для обоснования влажности, до которой предварительно высушиваются отходы окорки перед подачей на измельчение, и оценки целесообразности ее переработки в топливные брикеты [16; 20]. Эксперименты выполнены, в основном, для сосновой и еловой коры [9; 10; 13; 19].

*Цель работы* — дальнейшее развитие научного описания энергоемкости измельчения отходов окорки на основе дополнительных экспериментальных сведений об энергоемкости измельчения коры древесины лиственницы, березы и осины.

**Материалы и методы исследования.** Эксперименты выполнены для отходов окорки древесины лиственницы, березы и осины. Экспериментальный материал получен

на предприятии ООО «Листвин» (д. Вартемяги, Ленинградская область).

При проведении опытов использован промышленный измельчитель отходов *Erdwich M600/1-400*, основные технические характеристики которого приведены в табл. 1.

Измельчитель оборудован автоматическим датчиком для регистрации силы тока с возможностью записи данных, что позволяет фиксировать потребляемую мощность непосредственно в процессе измельчения. На основе результатов замеров проводится расчет работы, совершенной при измельчении сырья:

$$A_{изм} = -UI_{хол}(t_2 - t_1) + U \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt, \quad (1)$$

где  $U$  — напряжение в сети;  $I_{хол}$  — сила тока при работе измельчителя вхолостую;  $I(t)$  — функция силы тока, построенная интерполяцией результатов замеров;  $t_1$ ,  $t_2$  — время начала и конца наблюдения.

Удельная энергоемкость измельчения рассчитывается по формуле:

$$Q_{изм} = \frac{A_{изм}}{m_M}, \quad (2)$$

где  $m_M$  — масса измельченного материала.

Масса проб экспериментального материала составляла 4–5 кг, определялась с использованием товарных весов. Сырье предварительно просеивали с использованием колонки сит по ГОСТ 6613-86, диаметры сит указаны в табл. 2.

Для анализа гранулометрического состава продукта измельчения использована колонка сит по ГОСТ 16362-86, табл. 3.

**Таблица 1.** Основные технические характеристики измельчителя отходов *Erdwich M600/1-400*

Раскрыв для режущего механизма	402 x 502 мм
Количество валов	1 шт.
Количество статорных ножей	2 шт.
Количество роторных ножей	17 шт.
Диаметр ножей	220 мм
Ширина ножа	25 мм
Конфигурация ножей	3 шт., двойной крюк
Диаметр валов	65 мм
Скорость вращения режущего вала	35 об./мин
Диаметр отверстий в сите	5, 10 или 15 мм
Мощность приводного двигателя	5,5 кВт
Питающее напряжение	400/50 В/Гц

**Таблица 2.** Диаметры сит в колонке (подготовка сырья к эксперименту)

0	1	2	3	4	5	6	7
Поддон	2,8 мм	3,15 мм	8 мм	16 мм	31,5 мм	45 мм	63 мм

**Таблица 3.** Диаметры сит в колонке для анализа гранулометрического состава продукта измельчения

0	1	2	3	4	5	6	7
Поддон	0,25 мм	0,5 мм	1 мм	1,4 мм	2 мм	2,8 мм	3,15 мм

После сепарирования определяли массовые доли фракций на ситах для построения гистограмм гранулометрического состава экспериментального материала. Интегральные и дифференциальные характеристики гранулометрического состава экспериментального материала и продукта измельчения получали по формулам:

$$R_{x,i} = \frac{\sum_{j=i}^k m_j}{m_M} \cdot 100\% , \quad (3)$$

где  $m$  — масса остатка на сите;  $i, j$  — индексы, соответствующие номеру сита по табл. 2 и 3;  $k$  — число сит:

$$R_i = \frac{m_i + m_{i+1}}{2m_M} \cdot 100\% . \quad (4)$$

Для экспериментального материала определяли влажность в соответствии с ГОСТ 16483.7-71.

В связи с тем, что на практике затруднительно получить пробы материала со свойствами, соответствующими классическому плану полного факторного эксперимента, было принято решение о проведении эксперимента, план которого составлен по методу латинского квадрата. Факторы в опытах указаны в табл. 4.

**Таблица 4.** План эксперимента по измельчению коры ножевым рабочим органом

Материал	Влажность	Степень измельчения
Кора березы	После сушки в ленточной сушилке	максимальная
Кора лиственницы	После сушки в ленточной сушилке	минимальная
Кора лиственницы	Естественная	средняя
Кора осины	После сушки на воздухе	минимальная
Кора осины	После сушки в ленточной сушилке	средняя
Кора лиственницы	После сушки на воздухе	максимальная
Кора березы	После сушки на воздухе	средняя
Кора березы	Естественная	минимальная
Кора осины	Естественная	максимальная

В экспериментах для обеспечения максимальной степени измельчения устанавливали сито с диаметром отверстия на 5 мм на выходе из измельчителя. Для получения продукта со средней степенью измельчения использовали сито с диаметром отверстия 10 мм, минимальной степени измельчения соответствовало сито с диаметром 15 мм.

В научной литературе описано несколько законов измельчения, связывающих степень и энергоёмкость измельчения сырья (законы измельчения Риттингера, Кирпичева – Кика и Бонда). В работе, с учетом результатов [4], изучена энергоёмкость с позиции закона Бонда, его математическая формулировка следующая:

$$A_{изм} = K_B m_{изм} \left( \frac{1}{\sqrt{d_{cp}^*}} - \frac{1}{\sqrt{d_{cp}}} \right) \quad (5)$$

$$d_{cp} = \left( \frac{\sum \omega_i}{\sum \frac{\omega_i}{\sqrt{\frac{d_i + d_{i+1}}{2}}}} \right)^2 , \quad (6)$$

где  $\omega_i$  — массовая доля остатка на  $i$ -м сите.

Степень измельчения определяется с по формуле:

$$i = \frac{d_{cp}^*}{d_{cp}} , \quad (7)$$

где индекс «\*» соответствует продукту измельчения.

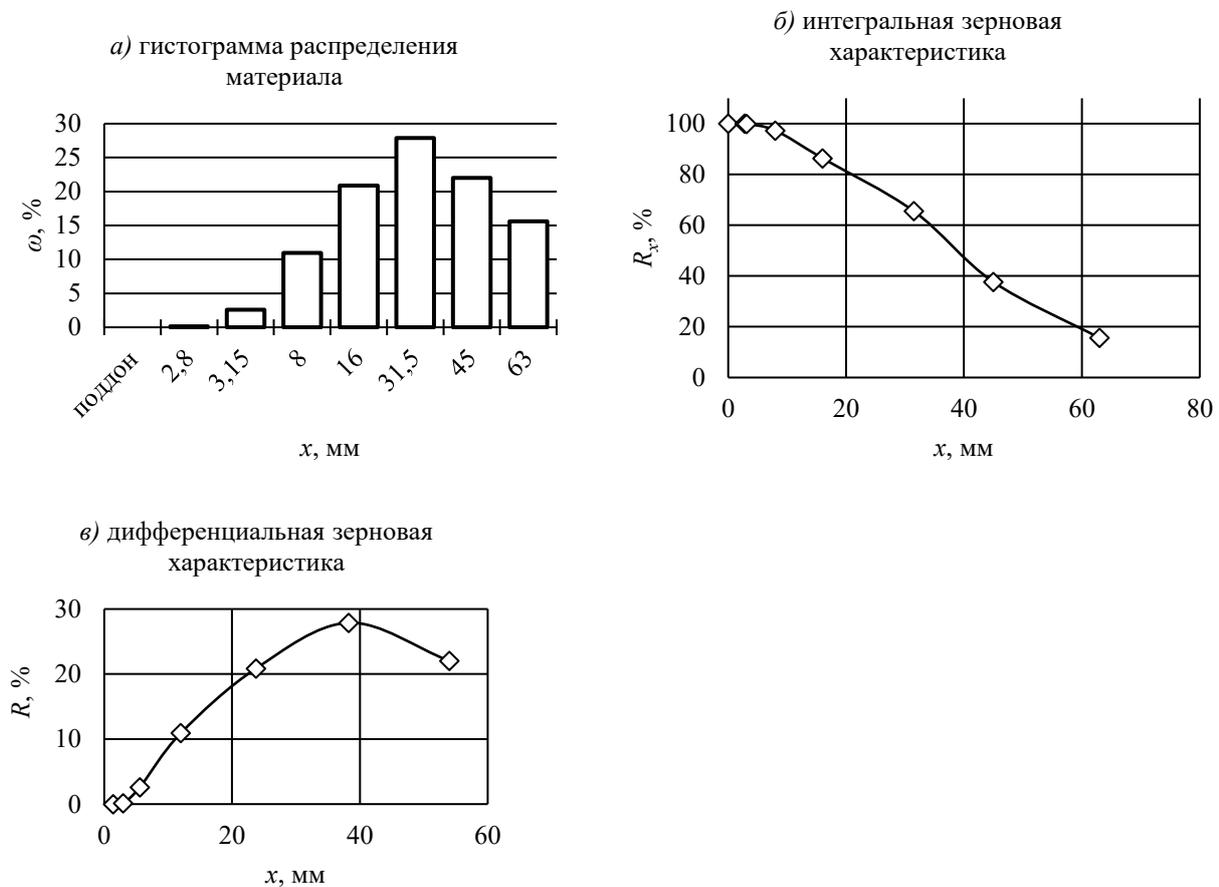
**Результаты исследования.** Результаты выполненных экспериментов по исследованию измельчения коры осины, березы и лиственницы приведены в табл. 5, 6 и на рис. 1, 2. В таблицах приведены средние значения экспериментальных величин для каждого опыта, данные получены при пяти повторениях.

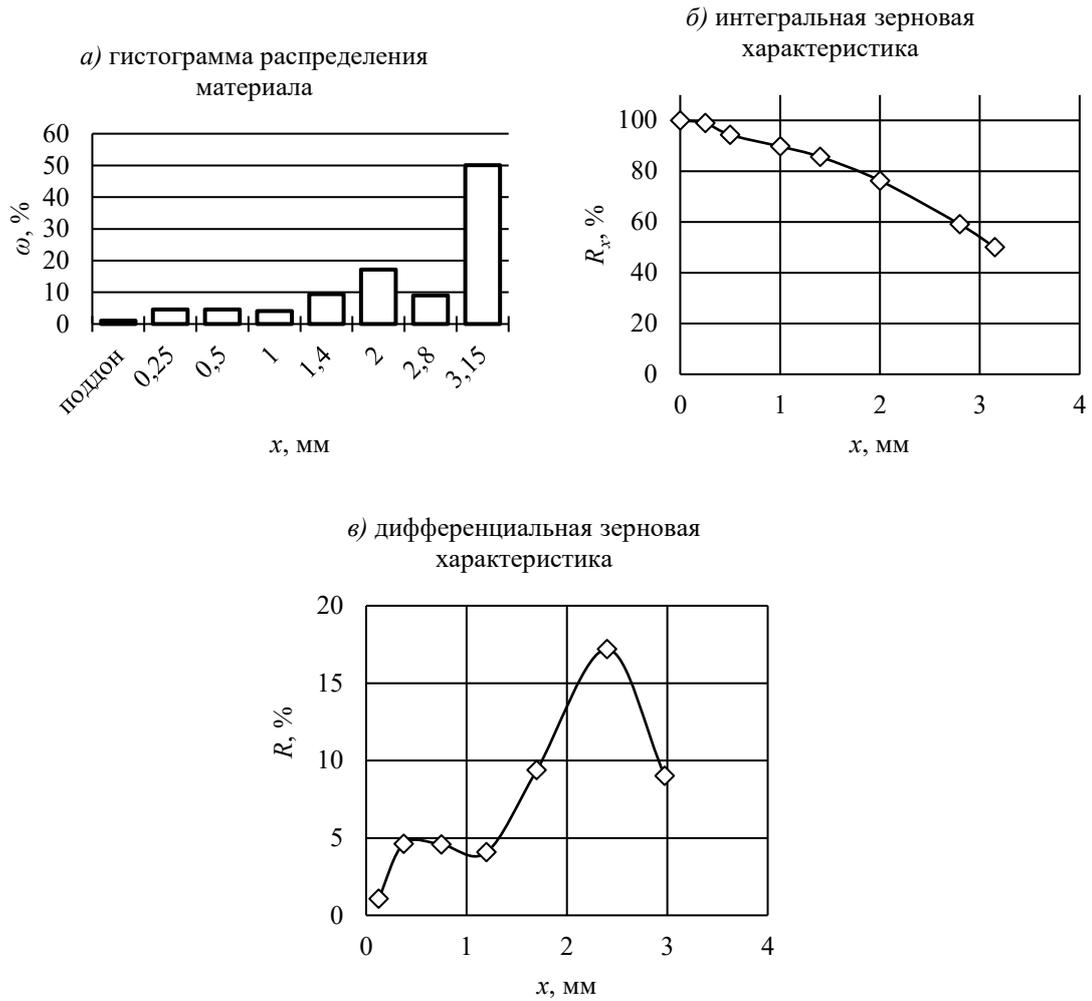
**Таблица 5.** Результаты экспериментов по измельчению коры с использованием ножевого измельчителя

$m, \text{кг}$	$W, \%$	$\rho_{12}, \text{кг/м}^3$	$A, \text{МДж}$	$Q, \text{МДж/кг}$
4,54	9,46	717,8	33,22	7,336
4,3	9,82	352	11,88	2,77
4,41	45,9	331	7,58	1,706
4,35	29,06	516,4	12,42	2,858
4,43	9,72	551,6	18,38	4,142
4,55	26,6	354,8	10	2,184
4,41	29,56	745	17,56	3,986
4,54	50,94	743,4	15,52	3,394
4,5	43,16	518,8	10,8 (	2,4

**Таблица 6.** Расчет показателей измельчения коры с использованием ножевого измельчителя

$d_{cp}, \text{мм}$	$d_{cp}^*, \text{мм}$	$i$	$K_B, \text{МДж/}$ $(\text{кг}\cdot\text{мм}^{0,5})$
27,36	0,87	31,578	8,32
27,5	1,34	20,52	4,12
28,12	1,21	23,224	2,36
27,96	1,28	21,858	4,12
27,98	1,23	22,788	5,8
27,92	0,86	32,57	2,46
28,02	1,23	22,804	5,58
27,34	1,3	21,112	4,98
28,1	0,86	32,584	2,7

**Рис. 1.** Гранулометрический состав экспериментального материала до измельчения в опыте № 2 (кора ливственницы, после сушки в ленточной сушилке, минимальная степень измельчения)



**Рис. 2.** Гранулометрический состав экспериментального материала после измельчения в опыте № 2

При помощи метода наименьших квадратов получили оценку коэффициента  $K$  в виде линейной функции:

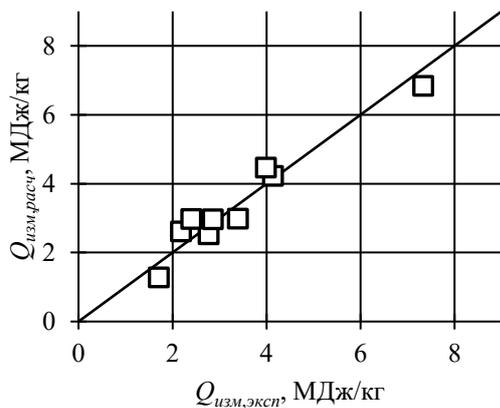
$$K_B = a_0 + a_1 \rho_{12} + a_2 W + a_3 \rho_{12} W. \quad (8)$$

Результаты расчетов коэффициентов уравнения (8) представлены в табл. 7.

Результаты сопоставления удельной работы измельчения, рассчитанной по полученному уравнению, с экспериментальными данными представлены на рис. 3.

**Таблица 7.** Результаты расчетов коэффициентов уравнения (8)

Коэффициент	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$R^2$
Значение	0,111	0,0118	-0,0165	$-9,7 \cdot 10^{-5}$	0,94



**Рис. 3.** Сопоставления расчетных и экспериментальных значений удельной работы измельчения

Расчет коэффициента детерминации  $R^2$  показывает, что результаты, полученные с использованием закона Бонда, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Далее получено уравнение регрессии для удельной энергоемкости измельчения  $Q_{изм}$  в виде полинома:

$$Q_{изм} = b_0 + b_1i + b_2\rho_{12} + b_3W + b_4\rho_{12}i + b_5Wi + b_6\rho_{12}W, \quad (9)$$

причем степень измельчения определяется по формулам (6), (7).

Результаты расчета коэффициентов уравнения (9) и их стандартные ошибки приведены в табл. 8.

**Таблица 8.** Результаты расчета коэффициентов уравнения (9)

Коэффициент	Значение	$S_b$	$t$
$b_0$	3,32	2,28	1,45
$b_1$	-0,0715	0,0849	0,843
$b_2$	-0,00911	0,00478	1,91
$b_3$	0,11	0,0362	3,05
$b_4$	0,000602	0,000153	3,93
$b_5$	-0,00624	0,00146	4,28
$b_6$	-0,00000308	0,0000465	0,0663

**Таблица 9.** Результаты расчета коэффициентов уравнения (10)

Коэффициент	Значение	$S_a$	$t$	$\Delta$
$a_1$	0,0628	0,0221	2,84	0,0568
$a_3$	0,0657	0,0223	2,94	0,0573
$a_4$	0,000255	0,0000333	7,64	0,0000856
$a_5$	-0,00488	0,000964	-5,07	0,00248

**Таблица 10.** Результаты проверки математической модели (10)

Статистика	Значение
$S^2_{воспр}$	0,3065
$S^2_{адекват}$	0,1294
$F$	2,3679
$G$	0,2532
$F_{крит}$	2,4772
$G_{крит}$	0,3584

В таблице обозначено:  $S^2_{воспр}$  — дисперсия воспроизводимости;  $S^2_{адекват}$  — дисперсия адекватности;  $F$  — расчетное значение критерия Фишера;  $G$  — расчетное значение критерия Кохрена;  $F_{крит}$  — критическое значение критерия Фишера;  $G_{крит}$  — критическое значение критерия Кохрена.

Опыты по определению удельной энергоемкости воспроизводимы по критерию Кохрена. Математическая модель (10) адекватна экспериментальным данным по критерию Фишера.

**Закключение.** В результате обработки экспериментальных данных об энергоемкости рубки коры древесины осины, березы и лиственницы установлено, что удельная работа измельчения достаточно точно рассчитывается на основе закона измельчения Бонда. Ко-

Для выявления значимых коэффициентов регрессии последовательно исключали коэффициенты с наименьшими значениями  $t$ -статистики по табл. 8 до тех пор, пока в модели не оставались лишь статистически значимые параметры. В итоге общий вид математической модели:

$$Q_{изм} = b_1i + b_3W + b_4\rho_{12}i + b_5Wi, \quad (10)$$

его коэффициенты и стандартные ошибки их определения приведены в табл. 9.

Результаты проверки сходимости опытных и расчетных данных, адекватности математической модели и воспроизводимости результатов определения удельной энергоемкости приведены в табл. 10.

эффициент пропорциональности в его выражении, уравнение (5), связан, главным образом, с плотностью коры и ее влажностью. После дальнейшей обработки опытных данных получена математическая модель, позволяющая оценить удельную энергоемкость измельчения коры с учетом степени измельчения по уравнениям (6), (7), ее влажности и плотности. Проверка математической модели (10) показала ее адекватность экспериментальным данным (расчетное значение критерия Фишера составило 2,3679 при критическом значении 2,4772). Полученные результаты дополняют сведения об энергоемкости рубки коры перед последующей переработкой и предлагаются для обоснования влажности, до которой предварительно следует высушивать отходы окорки перед подачей на измельчение,

а также для оценки целесообразности их переработки в топливные брикеты по критерию энергетической себестоимости.

#### Литература

1. Medvedev S.O., Zyryanov M.A., Mokhiev A.P., Kunitskaya O.A., Voronov R.V., Storodubtseva T.N., Grigorieva O.I., Grigorev I.V. Russian timber industry: current situation and modelling of prospects for wood biomass use // International Journal of Design and Nature and Ecodynamics. 2022. V. 17. № 5. P. 745-752.
2. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuev V.A., Sivtseva T.V., Zadrauskaite N.O., Gerts E.F., Markov O.B. Improving the efficiency of forest companies by optimizing the key indicators of sustainable forest management: a case study of the far east // Forest Science and Technology. 2022. V. 18. № 4. P. 190-200.
3. Власов Ю.Н., Григорьев И.В., Куницкая О.А., Хитров Е.Г. Анализ исследований по тематике измельчения древесных отходов // Resources and Technology. 2020. V. 17. № 1. P. 63-88.
4. Власов Ю.Н., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф., Степанова Д.И., Григорьева А.И. Экспериментальные исследования энергоёмкости прессования коро-древесных отходов // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2020. № 57. С. 25-28.
5. Власов Ю.Н. Теоретическое исследование влияния времени и скорости прессования на плотность брикетов из древесных опилок // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2019. № 227. С. 188-198.
6. Бастриков Д.В., Куницкая О.А. Анализ исследований по повышению энергоэффективности измельчения отходов окорки // Resources and Technology. 2018. V. 15. № 4. С. 1-30.
7. Коршак А.В., Бирман А.Р., Хитров Е.Г., Кортка А.А., Селимов А.М. К вопросу повышения надежности оборудования лесоперерабатывающего комплекса // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2010. № 191. С. 144-151.
8. Бастриков Д.В., Куницкая О.А., Григорьев М.Ф. Исследование процесса измельчения отходов окорки установкой с ножевым рабочим органом // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 3. С. 21-25.
9. Бастриков Д.В., Власов Ю.Н., Ильюшенко Д.А., Кучер С.В. Экспериментальные исследования энергоёмкости дробления отходов окорки сосны // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2017. № 219. С. 193-205.
10. Бастриков Д.В., Власов Ю.Н., Кучер С.В., Куницкая Д.Е. Экспериментальные исследования энергоёмкости дробления отходов окорки ели // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2016. № 217. С. 81-90.
11. Власов Ю.Н., Нестерова Е.В., Хитров Е.Г. Влияние параметров рабочего органа установки и физико-механических свойств древесного сырья на показатели процесса измельчения // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2020. № 230. С. 114-125.
12. Власов Ю.Н., Нестерова Е.В., Хитров Е.Г. Исследование кинетики изменения фракционного состава измельчаемого древесного сырья // Изв. С.-Петербург. лесотехн. акад. 2020. № 230. С. 126-140.
13. Voronova A., Kunickaya O., Burmistrova D., Storodubtseva T., Chzhan S., Nikiforova V., Shvetsova V., Kalita E. Mobile chipper scheduling in the production of fuel chips // Mathematical Modelling of Engineering Problems. 2022. V. 9. № 2. P. 425-430.
14. Kunickaya O., Pomigiev A., Kruchinin I., Storodubtseva T., Voronova A., Levushkin D., Borisov V., Ivanov V. Analysis of modern wood processing techniques in timber terminals //

*Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета.*

- Central European Forestry Journal. 2022. V. 68. № 1. P. 51-59.
15. Bukhtoyarov L.D., Kunitskaya O.A., Urazova A.F., Perfiliev P.N., Druzyanova V.P., Egipko S.V., Burgonutdinov A.M., Tikhonov E.A. Substantiating optimum parameters and efficiency of rotary brush cutters // Journal of Applied Engineering Science. 2022. V. 20. № 3. P. 788-797.
16. Krivoshapkina O., Yakovleva A., Zakharova A., Pavlova A., Eroshenko V., Gogoleva P., Tikhonov E., Kunickaya O. Environmental safety of residents of Yakutsk and Zhatay: evidence from sociological research // Journal of Environmental Studies and Sciences. 2022. V. 12. № 3. P. 566-576.
17. Kunickaya O., Zhuk A., Chzhan S., Runova E., Garus I., Ivanov V., Nikiforova V., Gorodnichina M. Reducing energy consumption of barkwood residue grinding on equipment with knife-based operational units // Journal of Applied Engineering Science. 2020. V. 18. № 3. P. 364-371.
18. Власов Ю.Н. Экспериментальные исследования измельчения отходов окорки березы // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 1 (41). С. 96-100.
19. Бастриков Д.В., Власов Ю.Н., Кучер С.В. Исследование энергоёмкости измельчения отходов окорки установкой с ножевым рабочим органом // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8. № 1 (29). С. 120-128.
20. Kunickaya O., Tomashevskaya E., Tatarinova Z., Burmistrova O., Nazarova I., Hertz E., Ivanov V., Baranova T., Egipko S., Krivoshapkina O. Russian sawmill modernization (a case study). Part 1: optimizing processes of low-grade timber debarking and wood chipping // International Wood Products Journal. 2021. V. 12. № 2. P. 107-115.

#### References

1. Medvedev S.O., Zyryanov M.A., Mokhiev A.P., Kunitskaya O.A., Voronov R.V., Storodubtseva T.N., Grigorieva O.I., Grigorev I.V. Russian timber industry: current situation and modelling of prospects for wood biomass use // International Journal of Design and Nature and Ecodynamics. 2022. V. 17. № 5. P. 745-752.
2. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuev V.A., Sivtseva T.V., Zadrauskaite N.O., Gerts E.F., Markov O.B. Improving the efficiency of forest companies by optimizing the key indicators of sustainable forest management: a case study of the far east // Forest Science and Technology. 2022. V. 18. № 4. P. 190-200.
3. Vlasov YU.N., Grigor'ev I.V., Kunickaya O.A., Hitrov E.G. Analysis of research on the topic of wood waste shredding // Resources and Technology. 2020. V. 17. № 1. P. 63-88.
4. Vlasov YU.N., Kunickaya O.A., Grigor'ev M.F., Stepanova D.I., Grigor'eva A.I. Experimental studies of the energy intensity of pressing bark and wood waste // Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa. 2020. № 57. P. 25-28.
5. Vlasov YU.N. Theoretical study of the influence of time and speed of pressing on the density of sawdust briquettes // Izvestia SPbLTA. 2019. № 227. P. 188-198.
6. Bastrikov D.V., Kunickaya O.A. Analysis of studies on improving the energy efficiency of grinding debarking waste // Resources and Technology. 2018. V. 15. № 4. P. 1-30.
7. Korshak A.V., Birman A.R., Hitrov E.G., Kortka A.A., Selimov A.M. On the issue of improving the reliability of the equipment of the timber processing complex // Izvestia SPbLTA. 2010. № 191. P. 144-151.
8. Bastrikov D.V., Kunickaya O.A., Grigor'ev M.F. Investigation of the process of grinding waste debarking by an installa-

- tion with a knife working body // *Remont, Vosstanovlenie, Modernizatsiya (Repair, Reconditioning, Modernization)*. 2019. № 3. P. 21-25.
9. Bastrikov D.V., Vlasov YU.N., Il'yushenko D.A., Kucher S.V. Experimental studies of the energy intensity of crushing pine debarking waste // *Izvestia SPbLTA*. 2017. № 219. P. 193-205.
  10. Bastrikov D.V., Vlasov YU.N., Kucher S.V., Kunickaya D.E. Experimental studies of the energy intensity of spruce debarking waste crushing // *Izvestia SPbLTA*. 2016. № 217. P. 81-90.
  11. Vlasov YU.N., Nesterova E.V., Hitrov E.G. Influence of the parameters of the working body of the installation and the physical and mechanical properties of wood raw materials on the performance of the grinding process // *Izvestia SPbLTA*. 2020. № 230. P. 114-125.
  12. Vlasov YU.N., Nesterova E.V., Hitrov E.G. Study of the kinetics of changes in the fractional composition of crushed wood raw materials // *Izvestia SPbLTA*. 2020. № 230. P. 126-140.
  13. Voronova A., Kunickaya O., Burmistrova D., Storodubtseva T., Chzhan S., Nikiforova V., Shvetsova V., Kalita E. Mobile chipper scheduling in the production of fuel chips // *Mathematical Modelling of Engineering Problems*. 2022. V. 9. № 2. P. 425-430.
  14. Kunickaya O., Pomiguyev A., Kruchinin I., Storodubtseva T., Voronova A., Levushkin D., Borisov V., Ivanov V. Analysis of modern wood processing techniques in timber terminals // *Central European Forestry Journal*. 2022. V. 68. № 1. P. 51-59.
  15. Bukhtoyarov L.D., Kunitskaya O.A., Urazova A.F., Perfiliev P.N., Druzyanova V.P., Egipko S.V., Burgonutdinov A.M., Tikhonov E.A. Substantiating optimum parameters and efficiency of rotary brush cutters // *Journal of Applied Engineering Science*. 2022. V. 20. № 3. P. 788-797.
  16. Krivoshapkina O., Yakovleva A., Zakharova A., Pavlova A., Eroshenko V., Gogoleva P., Tikhonov E., Kunickaya O. Environmental safety of residents of Yakutsk and Zhatay: evidence from sociological research // *Journal of Environmental Studies and Sciences*. 2022. V. 12. № 3. P. 566-576.
  17. Kunickaya O., Zhuk A., Chzhan S., Runova E., Garus I., Ivanov V., Nikiforova V., Gorodnichina M. Reducing energy consumption of barkwood residue grinding on equipment with knife-based operational units // *Journal of Applied Engineering Science*. 2020. V. 18. № 3. P. 364-371.
  18. Vlasov YU.N. Experimental studies of birch debarking waste shredding // *Systems. Methods. Technologies*. 2019. № 1 (41). P. 96-100.
  19. Bastrikov D.V., Vlasov YU.N., Kucher S.V. Study of the energy intensity of grinding waste debarking plant with a knife working body // *Forestry Engineering Journal*. 2018. V. 8. № 1 (29). P. 120-128.
  20. Kunickaya O., Tomashevskaya E., Tatarinova Z., Burmistrova O., Nazarova I., Hertz E., Ivanov V., Baranova T., Egipko S., Krivoshapkina O. Russian sawmill modernization (a case study). Part 1: optimizing processes of low-grade timber debarking and wood chipping // *International Wood Products Journal*. 2021. V. 12. № 2. P. 107-115.