УДК 674.81 DOI: 10.18324/2077-5415-2019-1-96-100

Экспериментальные исследования измельчения отходов окорки березы

Ю.Н. Власов

Якутская государственная сельскохозяйственная академия, Сергеляхское шоссе 3, Якутск, Республика Саха, Россия
gnvlasov@yandex.ru
Статья поступила 18.12.2018, принята 16.01.2019

Цель работы — получить регрессионные уравнения, связывающие параметры ножевого измельчителя и свойства отходов окорки древесины березы с фракционным составом измельченных отходов и энергоемкостью процесса измельчения. Проведен активный управляемый эксперимент, реализованный по плану Бокса– Бенкина2-го порядка с шестью опытами в центре плана, общее число опытов составило 46. В качестве опытной установки использован промышленный измельчитель отходов ErdwichM600/1–400. Экспериментальный материал получен после окорки сортиментов березы на роторном окорочном станке. Целевыми функциями являлись средняя крупность отходов после измельчения, степень измельчения, удельная энергоемкость. К управляемым факторам отнесены влажность сырья, средняя крупность отходов до измельчения, угол заточки ножей измельчителя, частота вращения рабочего органа измельчителя, диаметр сита измельчителя. Составлены регрессионные уравнения 2-го порядка, связывающие среднюю крупность отходов после измельчения, степень измельчения, удельную энергоемкость со средней фракцией отходов до измельчения, их влажностью, углом заточки ножей измельчителя, частотой вращения рабочего органа машины и диаметром отверстий сита. Модели адекватны по критерию Фишера. Исследование полученных уравнений показывает, что минимум энергоемкости достигается при величине угла заточки ножей 30^o и частоте вращения рабочего органа 32 об./мин. При оптимальных параметрах установки для измельчения отходов окорки березы в 10–15 раз, т. е. до средней крупности, пригодной для брикетирования, расходуется 1,5–2,7 МДж энергии на килограмм сырья, в зависимости от влажности. Перспективные направления дальнейших исследований лежат в области изучения энергоемкости измельчения отходов окорки хвойных пород древесины — сосны и ели.

Ключевые слова: отходы окорки березы; измельчение; ножевой рабочий орган; энергоемкость.

Experimental studies of birch barking waste shredding

Yu.N. Vlasov

Yakutsk State Agricultural Academy; 3rd km, 3, Sergelyakhskoe Highway, Yakutsk, Russia
gnvlasov@yandex.ru
Received 18.12.2018, accepted 16.01.2019

The aim of the work is to obtain regression equations relating the parameters of the knife grinder and the properties of the waste of birch debarking with the fractional composition of the crushed waste and the energy intensity of the grinding process. An active controlled experiment implemented according to the second-order Box-Benkin plan with six experiments in the center of the plan was carried out. The total number of experiments was 46. The industrial waste shredder ErdwichM600 / 1-400 was used as a pilot plant. Experimental material was obtained after debarking birch assortments on a rotary debarking machine. The target functions were the average size of the waste after grinding, the degree of grinding, the specific energy consumption. The controlled factors include the moisture content of the raw materials, the average size of the waste before grinding, the angle of sharpening of the shredder's knives, the frequency of rotation of the shredder's working body, the diameter of the shredder's sieve. Regression equations of the 2nd order relating the average size of the waste after grinding, the degree of grinding, specific energy intensity are compiled with an average fraction of the waste before grinding, the angle of sharpening of the chopper knives, the frequency of rotation of the working body of the machine and the diameter of the sieve holes. The models are adequate according to the Fisher criterion. The study of the obtained equations shows that the minimum energy consumption is achieved with a knife sharpening angle of 30 ° and a rotational speed of the working member 32 rpm. With optimal settings for shredding waste birch debarking 10–15 times, i.e., to the average size suitable for briquetting, 1.5–2.7 MJ of energy per kilogram of raw material is consumed, depending on humidity. Promising areas for further research are in the field of studying the energy intensity of grinding the debarking waste of coniferous species of wood - pine and spruce.

Keywords: birch debarking waste; shredding; knife body; energy consumption.

Введение

На лесопромышленных предприятиях, где происходит окорка лесоматериалов, образуются большие объемы отходов —коры с включением отщепа, и перед лесоперерабатывающей отраслью стоит проблема их утилизации [1;2]. Было показано, что отходы окорки могут использоваться как сырье для производства брикетированного биотоплива [3–7], однако для этого их необходимо измельчить до фракции, ориентировочно, 5 мм [8–12]. Ранее выполнены экспериментальные исследования процессов измельчения отходов окорки сортиментов сосны и ели [13–17], однако в них не учитывались факторы, относящиеся к параметрам работы установки-измельчителя, что сужает область практического применения полученных результатов. Измельчение отходов окорки лиственной древесины, насколько нам известно, практически не исследовано.

Цель работы—получить регрессионные уравнения, связывающие параметры ножевого измельчителя и свойства отходов окорки древесины березы с фракционным составом измельченных отходов и энергоемкостью процесса измельчения.

Методы исследования—планирование эксперимента, активный управляемый эксперимент, методы статистической обработки опытных данных.

Постановка задачи. В качестве опытной установки использован промышленный измельчитель отходов Erdwich M600/1–400.Общий вид установки представлен на рис. 1, фотография рабочего органа измельчителя —на рис. 2. Установка использовалась ранее при выполнении исследований [13–16; 18], ее подробное техническое описание приводится в работе [13].

Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки

Рис. 2. Рабочий орган экспериментальной установки

Целевыми функциями являлись средняя крупность отходов после измельчения *f, мм*; степень измельчения *i*; удельная энергоемкость *Q, МДж/кг*. К управляемым факторам отнесены влажность сырья *W,%*; средняя крупность отходов до измельчения *D,мм*; угол заточки ножей измельчителя *α*, ^{o}; частота вращения рабочего органа измельчителя *n, об./мин*; диаметр сита измельчителя *d*, *мм*.

Уровни и интервалы варьирования факторов представлены в табл.1.

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов в опытах по изучению измельчения отходов окорки

Фактор	Значение при соответствующем уровне варьирования			Интервал варьирования
	Нижний –1	Основной 0	Верхний +1	
W, %	10	40	70	30
D, мм	30	50	70	20
α, ^{o}	30	45	60	15
n, об./мин	20	35	50	15
d, мм	10	20	30	10

Экспериментальный материал получен после окорки сортиментов березы на роторном окорочном станке. Отходы окорки трех групп влажности *W* перед опытами сепарировали с целью контроля фракции *D*. Удельную энергоемкость измельчения определяли как отношение работы измельчения пробы экспериментального материала в опыте к ее массе [13–16], составлявшей 5 кг. Работу измельчения определяли по величине потребляемой силы тока в процессе измельчения, которую, в свою очередь, регистрировали при помощи электронного датчика, встроенного в щиток управления измельчителем [13–16]. Степень измельчения представляет собой отношение фракции *D* к фракции *f* измельченного сырья (определялась по методике [13–16].

Эксперимент реализован по плану Бокса– Бенкина2-го порядка с шестью опытами в центре плана, общее число опытов составило 46.

Результаты исследования. В табл. 2 представлена статистика, необходимая для проверки воспроизводимости опытов.

Таблица 2

Проверка воспроизводимости опытов по исследованию измельчения отходов окорки древесины березы

Статистика	Экспериментальная величина		
	f, мм	*i*	*Q, МДж/кг*
S^2_{max}	10,402	1,855	0,1465
ΣS^2	119,907	20,680	1,9442
$G_{расч}$	0,0868	0,0897	0,0754
$G_{крит}$	0,0965	0,0965	0,0965

Для средней фракции продукта измельчения расчетное значение критерия Кохрена составляет $G_{расч}$ = 0,0868, для степени измельчения $G_{расч}$ = 0,0897, для удельной энергоемкости расчетное значение $G_{расч}$ = 0,0754. Во всех случаях расчетное значение меньше критического $G_{крит}$ = 0,0965 при уровне значимости α = 0,05, таким образом, опыты по измельчению отходов окорки березы воспроизводимы.

Обработка экспериментальных данных показала, что средняя фракция отходов окорки древесины березы после измельчения f,10^4 *мм*, связана со средней крупностью отходов до измельчения D, *мм*, углом заточки ножей измельчителя α, °, частотой вращения рабочего органа машины n, *об./мин*, и диаметром сита измельчителя d, *мм*, уравнением:

$$f = 272200 - 3463D - 17800\alpha + 10310n + 18210d -$$
$$+ 61D\alpha - 131{,}6\alpha n - 368\alpha d + 164nd + 228\alpha^2 - 65{,}76n^2 . \quad (1)$$

Степень измельчения отходов окорки древесины березы $i \cdot 10^4$ связана со средней фракцией отходов до измельчения D,*мм*, углом заточки ножей измельчителя α,°, частотой вращения рабочего органа машины n, *об./мин*, и диаметром отверстий сита d, *мм*, уравнением:

$$i = 3778D + 6075\alpha - 6234n - 8175d - 32{,}24Dn - 72{,}53Dd -$$
$$- 42{,}12\alpha n - 134{,}1\alpha d + 150{,}2nd + 71{,}35n^2 + 216{,}4d^2 . \quad (2)$$

Удельная энергоемкость измельчения отходов окорки древесины березы Q, 10^4*МДж/кг*, связана со средней фракцией отходов до измельчения D, *мм*, их влажностьюW, *%*, углом заточки ножей измельчителя α, °, частотой вращения рабочего органа машины n, *об./мин*, и диаметром отверстий сита d, *мм*, уравнением:

$$Q = 57160 - 2363n - 1349d - 4{,}081W\alpha + 5{,}716D\alpha +$$
$$1{,}201W^2 + 6{,}856\alpha^2 + 30{,}08n^2 + 18{,}08d^2 . \quad (3)$$

В табл. 3 представлены расчетные данные, позволяющие проверить адекватность уравнений регрессии (1) – (3).

Для средней фракции отходов окорки березы после измельчения расчетное значение критерия Фишера составляет $F_{расч}$ = 0,9097, что меньше критического значения F-распределения $F_{крит}$ = 1,4873 при уровне значимости α = 0,05. Для степени измельчения $F_{расч}$ = 1,3857, что меньше критического значения F-распределения $F_{крит}$ = 1,4873. Для удельной энергоемкости расчетное значение $F_{расч}$ = 0,6572, что вновь меньше критического значения F-распределения $F_{крит}$ = 1,4758. Во всех случаях расчетное значение критерия Фишера меньше критического, таким образом, гипотезы об адекватности регрессионных уравнений (1) – (3) принимаются.

Таблица 3

Проверка адекватности уравнений регрессии (1) – (3)

Статистика	Регрессионная модель		
	f (1)	*i* (2)	*Q* (3)
$S^2_{адекв}$	2,3714	0,6230	0,0278
$f_{адекв}$	35	35	37
$S^2_{воспр}$	2,6067	0,4496	0,0423
$f_{воспр}$	184	184	184
$F_{расч}$	0,9097	1,3857	0,6572
$F_{крит}$	1,4873	1,4873	1,4758
R^2	0,9743	0,9592	0,9738

Кроме того, экспериментальные данные позволили установить, что удельная энергоемкость измельчения отходов окорки древесины березы Q, 10^4 *МДЖ/кг*, связана со средней фракцией отходов до измельчения D,*мм*, их влажностью W, *%*, средней фракцией отходов после измельчения f,*мм*, углом заточки ножей измельчителя α, °, частотой вращения рабочего органа машины n, *об./мин*, и диаметром отверстий сита d, *мм*, уравнением:

$$Q = 291D + 2627\alpha - 2861n - 3529d + 3920f - 1{,}715WD +$$
$$+ 44{,}1\alpha d - 84{,}82\alpha f - 24{,}87nf + 42{,}11df - 20{,}93\alpha^2 +$$
$$+ 36{,}8n^2 - 25{,}49f^2 . \quad (4)$$

Удельная энергоемкость измельчения отходов окорки древесины березы Q, 10^4 *МДЖ/кг*, связана с влажностью отходов W, *%*, углом заточки ножей измельчителя α, °, частотой вращения рабочего органа машины n, *об./мин*, диаметром отверстий сита d, *мм*, и степенью измельчения уравнением:

$$Q = -611{,}2n + 5055i - 16{,}56Wi - 27{,}57ni +$$
$$+ 4{,}155\alpha^2 + 11{,}54n^2 - 114{,}4i^2 . \quad (5)$$

Статистика, необходимая для проверки адекватности представленных уравнений, приведена в табл. 4.

Таблица 4

Результаты проверки адекватности регрессионных зависимостей (4), (5)

Статистика	Регрессионная модель	
	$Q = q(D,f)$ (4)	$Q = q(i)$ (5)
$S^2_{адекв}$	0,0205	0,0464
$f_{адекв}$	32	39
$S^2_{воспр}$	0,0423	0,0423
$f_{воспр}$	184	184
$F_{расч}$	0,4846	1,0969
$F_{крит}$	1,5067	1,4653
R^2	0,9833	0,954

Гипотезы об адекватности регрессионных моделей (4), (5) принимаются, поскольку в обоих случаях расчетные значения критерия Фишера меньше критических значений F-распределения при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$.

Заключение

Уравнения (4) – (5) позволяют проводить расчет средней фракции измельченных отходов окорки древесины березы, их степени измельчения и удельной энергоемкости с учетом влажности и крупности отходов до измельчения, а также параметров измельчителя —угла заточки ножей и частоты вращения рабочего органа машины, диаметра отверстий сита измельчителя.

С использованием уравнений (4), (5) проводится расчет удельной энергоемкости измельчения отходов окорки березы в зависимости от требуемой средней фракции отходов либо степени их измельчения, влажности, угла заточки ножей и частоты вращения рабочего органа машины, диаметра отверстий сита измельчителя.

Исследование уравнений (4), (5) показывает, что минимум энергоемкости Q достигается при величине угла заточки ножей $\alpha = 30^o$ и частоте вращения рабочего органа n = 32 об./мин.

Пример расчета удельной энергоемкости измельчения отходов окорки березы при оптимальных параметрах измельчителя представлен на рис.3.

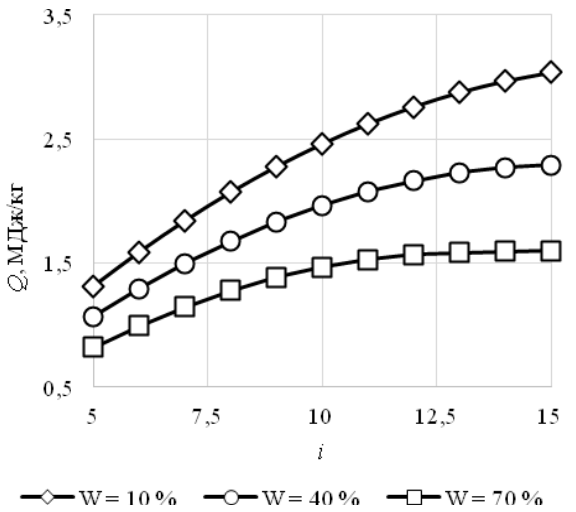

Рис. 3. Пример расчета удельной энергоемкости измельчения отходов окорки березы при оптимальных параметрах измельчителя

Результаты экспериментов и расчетов с использованием полученных регрессионных зависимостей показывают, что факторы, относящиеся к ножевому измельчителю, оказывают статистически значимое влияние на энергоемкость процесса измельчения. При оптимальных параметрах установки для измельчения отходов окорки березы в 10–15 раз, т. е. до средней крупности, пригодной для брикетирования, расходуется 1,5–2,7 МДж энергии на килограмм сырья. Влажные отходы измельчаются сравнительно легче. В дальнейшем нами планируются эксперименты по изучению энергоемкости измельчения отходов окорки хвойных пород древесины —сосны и ели.

Литература

1. Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A., Bozhbov V., Ivanov V. New approach for forest production stocktaking based on energy cost // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. 2014. P. 407–414.

2. Grigorev I., Nikiforova A., Khitrov E., Ivanov V., Gasparian G. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. 2014. P. 443-446.

3. Lindner M., Sohngen B., Joyce L., Price D., Bernier P., Karjalainen T. Integrated forestry assessments for climate change impacts // Forestry Ecology and Management. 2002. № 162. P. 117-136.

4. Rhen C., Ohman M., Gref R., Wasterlund I. Effect of raw material composition in woody biomass pellets on combustion characteristics.: Biomass and Bioenergy, 2007. P. 66-72.

5. Sikkema K., Steiner M., Junginger M., Hiegl W., Hansen M., Faaij A. The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 2013. № 5. P. 250–278.

6. Arun K. Tripathi, P.V.R. Iyer and Tara Chandra Kandpal. Techno -economic evaluation of biomass briquetting in India // Biomass and bioenergy. 1998. Vol. 14, is. 5-6. P. 479-488.

7. Takeshita T. A strategy for introducing modern bioenergy into developing Asia to avoid dangerous climate change // Applied Energy. 2009. № 86. P. 222–232.

8. Fuentealba C., Salazar Montory J., Vega J., Norambuena-Contreras J. New Biobased composite material using bark fibres Euca-lyptus, 2016.

9. Rabier F., Temmerman M., Bohm T., Hartmann H., Daugbjerg P., Rathbauer J. Particle density determination of pellets and briquettes. Biomass and Bioenergy. 2006. № 30. P. 954–963.

10. Samuelsson R., Thyrel M., Sjöström M., Lestander T. Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. Fuel Processing Technology. 2009. № 90. P. 1129–1134.

11. Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J., Krzyzaniak M., Gulczynski P., Mleczek M. Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass // Renewable Energy. 2013. № 57. P. 20-26.

12. Бастриков Д.В., Чибирев О.В., Кацадзе В.А., Локштанов Б.М., Ползиков А.Н. Брикетирование древесных отходов // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы междунар. науч.-технической конф. Вологда, 2016. С. 102-105.

13. Бастриков Д.В. Повышение энергоэффективности измельчения отходов окорки на оборудовании с ножевым рабочим органом: дис. … канд. техн. наук. Вологда, 2018. 118 с.

14. Бастриков Д.В., Власов Ю.Н., Ильюшенко Д.А., Кучер С.В. Экспериментальные исследования энергоемкости дробления отходов окорки сосны // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2017. № 219. С. 120-127.

15. Бастриков Д.В., Власов Ю.Н., Кучер С.В. Исследование энергоемкости измельчения отходов окорки установкой с ножевым рабочим органом // Лесотехнический журнал. 2018. Т. 8, № 1. С. 120-128.

16. Бастриков Д.В., Власов Ю.Н., Кучер С.В., Куницкая Д.Е. Экспериментальные исследования энергоемкости дробления отходов окорки ели // Изв. С.-Петерб. лесотехн. акад. 2016. № 217. С. 81-90.

17. Бастриков Д.В., Кацадзе В.А. Модель изменения фракционного состава коры в ходе измельчения // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. Т. 3, № 2-2 (13-2). С. 170-173.

18. Бастриков Д.В., Чибирев О.В., Кацадзе В.А., Локштанов Б.М. Современное оборудование для подготовки древесных отходов к брикетированию // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы междунар. науч.-технической конф. Вологда, 2016. С. 100-102.

References

1. Grigorev I., Khitrov E., Kalistratov A., Bozhbov V., Ivanov V. New approach for forest production stocktaking based on energy cost // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. 2014. P. 407-414.

2. Grigorev I., Nikiforova A., Khitrov E., Ivanov V., Gasparian G. Softwood harvesting and processing problem in Russian Federation // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 14. 2014. P. 443-446.

3. Lindner M., Sohngen B., Joyce L., Price D., Bernier P., Karjalainen T. Integrated forestry assessments for climate change impacts // Forestry Ecology and Management. 2002. № 162. P 117-136.

4. Rhen C., Ohman M., Gref R., Wasterlund I. Effect of raw material composition in woody biomass pellets on combustion characteristics: Biomass and Bioenergy, 2007. P. 66-72.

5. Sikkema K., Steiner M., Junginger M., Hiegl W., Hansen M., Faaij A. The European wood pellet markets: current status and prospects for 2020. Biofuels, Bioproducts and Biorefining. 2013. № 5. P. 250-278.

6. Arun K. Tripathi, P.V.R. Iyer and Tara Chandra Kandpal. Techno-economic evaluation of biomass briquetting in India // Biomass and bioenergy. 1998. Vol. 14, is. 5-6. P. 479-488.

7. Takeshita T. A strategy for introducing modern bioenergy into developing Asia to avoid dangerous climate change // Applied Energy. 2009. № 86. P. 222-232.

8. Fuentealba C., Salazar Montory J., Vega J., Norambuena-Contreras J. New Biobased composite material using bark fibres Euca-lyptus, 2016.

9. Rabier F., Temmerman M., Bohm T., Hartmann H., Daugbjerg P., Rathbauer J. Particle density determination of pellets and briquettes. Biomass and Bioenergy. 2006. № 30. P. 954-963.

10. Samuelsson R., Thyrel M., Sjöström M., Lestander T. Effect of biomaterial characteristics on pelletizing properties and biofuel pellet quality. Fuel Processing Technology. 2009. № 90. P. 1129-1134.

11. Stolarski M., Szczukowski S., Tworkowski J., Krzyzaniak M., Gulczynski P., Mleczek M. Comparison of quality and production cost of briquettes made from agricultural and forest origin biomass // Renewable Energy. 2013. № 57. P. 20-26.

12. Bastrikov D.V., Chibirev O.V., Kacadze V.A., Lokshtanov B.M., Polzikov A.N. Briquetting of wood waste // Aktual’nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoj konf. Vologda, 2016. P. 102-105.

13. Bastrikov D.V. The energy efficiency of the crushing of the debarking equipment with the knife working body: dis. … kand. tekhn. nauk. Vologda, 2018. 118 p.

14. Bastrikov D.V., Vlasov YU.N., Il’yushenko D.A., Kucher S.V. Experimental studies of energy consumption of pine debarking wastes shredding // Izvestia SPbLTA. 2017. № 219. P. 120-127.

15. Bastrikov D.V., Vlasov YU.N., Kucher S.V. Investigation of the energy consumption of barking waste grinding by installation with a knife working body // Forestry Engineering Journal. 2018. T. 8, № 1. P. 120-128.

16. Bastrikov D.V., Vlasov YU.N., Kucher S.V., Kunickaya D.E. Experimental studies of energy consumption of debarking wastes shredding // Izvestia SPbLTA. 2016. № 217. P. 81-90.

17. Bastrikov D.V., Kacadze V.A. Model of changes in the fractional composition of the crust during grinding // Aktual’nye napravleniya nauchnyh issledovanij XXI veka: teoriya i praktika. 2015. T. 3, № 2-2 (13-2). P. 170-173.

18. Bastrikov D.V., Chibirev O.V., Kacadze V.A., Lokshtanov B.M. Modern equipment for preparation of wood waste for briquetting // Aktual’nye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: materialy mezhdunar. nauch.-tekhnicheskoj konf. Vologda, 2016. P. 100-102.