

УДК 628.4.034

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДРОБЛЕНИЯ ОТХОДОВ НЕТКАНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОВЫШЕННОЙ ЖЕСТКОСТИ И ПЛОТНОСТИ

*Е.Л. Лукьянова, Н.В. Ульянова*

*Витебский государственный технологический университет, Республика Беларусь*

*Рассмотрены подходы к решению вопроса дробления отходов нетканых материалов повышенной жесткости и плотности, направления и технологии переработки вторичного сырья с получением востребованной продукции, организация процесса переработки отходов в сочетании с современным оборудованием.*

Промышленная деятельность предприятий с каждым годом постепенно увеличивает объемы отходов, что оказывает комплексное отрицательное влияние на экологическое состояние окружающей среды и здоровье населения. Проблемы экологии являются объектом внимания со стороны государства и научных сотрудников. Существуют различные технологии вторичного использования текстильных отходов [1-3], но все они требуют их подготовки [4].

Отходы нетканых материалов повышенной жесткости и плотности измельчаются в молотковых дробилках. Далее частицы сортируют на ситовых устройствах. Количество фракций зависит от числа сит, их расположения, формы и размеров отверстий сита, через которые выгружают измельченную волокнистую массу. В состав участка измельчения входит накопительный бункер с ворошителем и шнековым питателем, молотковая дробилка, система пневмотранспорта и скребковый конвейер. На участке сушки в конвективных сушильных агрегатах из волокнистой массы при необходимости удаляется избыточная влага.

Проблемами математического описания процессов разрушения, происходящих при измельчении различных материалов, занимаются ученые в области механики контактного взаимодействия, в прикладной и строительной механике [5-7]. Нами был исследован процесс дробления отходов нетканых материалов повышенной жесткости и плотности, физико-механические свойства которых варьируются в широких пределах.

Согласно предположению Риттингера [8], работа дробления ( $A$ ) прямо пропорциональна площади вновь образованной поверхности

$$A = \sigma \Delta s,$$

где  $\sigma$  – коэффициент пропорциональности, Дж/м<sup>2</sup>,  $\Delta s$  – площадь вновь образованной поверхности, м<sup>2</sup>.

Существующее понятие степени измельчения ( $i$ ) рассчитывается как отношение размера измельчаемого куска  $D$  к размеру продукта измельчения  $d$ . Размеры  $D$  и  $d$  в теории определяются несколькими способами, например, как среднее арифметическое либо среднее геометрическое граней тела (куска). В этом случае для куба размер куска совпадает по значению с длиной одной грани. Очевидно, что число вновь образованных кусков  $n = (D/d)^3 = i^3$ .

При разрушении куска кубической формы с размером  $D$  площадь вновь образованной поверхности, если обратиться к формулировке Риттингера, определится по формуле

$$A = k_R D^2,$$

где  $k_R$  – коэффициент пропорциональности.

На основании закона Кирпичева-Кика и предположений Ребиндера и Бонд в общем виде законы дробления можно представить формулой [8]

$$A = k D^m, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $m$  – показатель степени при размере куска, подлежащего дроблению.

Тогда при дроблении материала массой  $Q$ , который состоит из кусков  $N$ , формула (1) примет вид

Таблица 1. Характеристики фрезерной дробилки ДФК256/600У1

Параметра	Значение
Производительность, кг/ч	50-100
Мощность привода вращения фрезы, кВт	15
Диаметр фрезы, мм	256
Частота вращения фрезы, мин <sup>-1</sup>	60
Ход толкагеля, мм	600
Скорость перемещения толкагеля, мм/мин	100-600

$$A_Q = kD^m N = kD^m \frac{Q}{\delta D^3} = k_1 D^{m-3} Q,$$

где  $\delta$  – плотность материала;  $k_1 = k/d$  – коэффициент пропорциональности.

Путем преобразований, согласно литературному источнику [8] имеем математические выражения, связывающие работу измельчения с массой, крупностью и степенью измельчения кусков материала:

– для закона Риттингера

$$A_Q = K_R Q \frac{i-1}{D_{cp}}. \quad (2)$$

– для закона Кирпичева-Кика

$$A_Q = K_K Q \cdot \ln i. \quad (3)$$

– для закона Бонда

$$A_Q = K_B Q \left( \frac{1}{\sqrt{d_{cp}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{cp}}} \right). \quad (4)$$

В литературе [8] отмечается, что три закона измельчения являются приближенными, и использование каждого из них в тех или иных условиях позволяет описать наблюдаемый процесс измельчения конкретного материала на конкретном оборудовании с разной точностью.

Математические модели (2-4) содержат в себе неизвестные коэффициенты пропорциональности  $K_R$ ,  $K_K$  и  $K_B$ , которые подлежат экспериментальному определению.

Заметим, что в законе измельчения Риттингера (2) используется не только очевидный показатель – степень измельчения, но и начальные размеры кусков материала. Таким образом, в число управляемых факторов эксперимента следует включить начальную крупность кусков измельчаемого продукта.

В законе измельчения Бонда (4), помимо начальных размеров кусков материала, используется также и размеров продукта измельчения. Таким образом, эксперимент следует провести с учетом необходимости получить возможно больший диапазон размеров частиц измельченного продукта.

В экспериментальных исследованиях необходимо проверить соответствие показателей энергоемкости измельчения отходов нетканых материалов повышенной жесткости и плотности закону дробления Риттингера (2), Кирпичева-Кика (3) и Бонда (4), связывающих работу измельчения и степень измельчения продукта.

Для закона дробления, наиболее адекватного процессу измельчения таких отходов, необходимо определить коэффициент пропорциональности, и тогда будет получена научная база для описания процесса их измельчения.

Цель экспериментальных исследований – установить закономерность для оценки затрат энергии, требующейся для измельчения древесосодержащих отходов в зависимости от степени измельчения  $i$  и их относительной влажности  $W$ .

Первый этап подготовки экспериментального материала заключался в создании нужной относительной влажности отходов. Использовали три группы влажности: отходы в чистом виде при отделении от частей бытовой техники ( $W \approx 70\%$ ), подсушенные на воздухе ( $W \approx 65\%$ ) и подсушенные в сушильной камере ( $W \approx 50\%$ ). Влажность определяли весовым методом. Затем осуществлялся сам процесс дробления. Для измельчения использовалась фрезерная дробилка ДФК256/600У1, установленная в ВГТУ, характеристика которой представлена в табл. 1.

Дробление проводилось с набором различных по диаметру сит. Отходы отбирали таким образом, чтобы средняя крупность кусков до измельчения  $D$  составляла  $70 \pm 5$  см,  $50 \pm 5$  см и  $30 \pm 5$  см. Для измельчения брали  $10 \pm 0.2$  кг отходов. Степень измельчения оценивали по размеру частиц 3, 2 и 1 см (ячейка сита). Работа  $A$ , совершенная во время измельчения отходов, рассчиты-

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента

Номер опыта	Кодированные значения		Натуральные значения			
	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	влажность, %	степень измельчения, раз		
				70±5 см	50±5 см	30±5 см
1	1	1	80	70	50	30
2	1	0	80	35	25	15
3	1	-1	80	23	17	10
4	0	1	65	70	50	30
5	0	0	65	35	25	15
6	0	-1	65	23	17	10
7	-1	1	50	70	50	30
8	-1	0	50	35	25	15
9	-1	-1	50	23	17	10

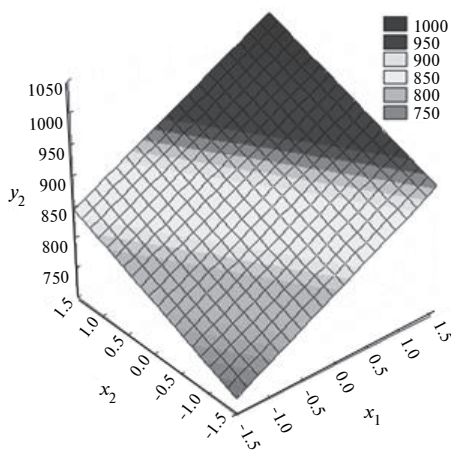


Рис. 1. Зависимость затрат энергии при дроблении древесных отходов от степени дробления и их влажности при размере кусков 70±5 см,

$$\text{модель: } y_2 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2;$$

$$z = (879.222) + (61.8333)x + (39.6667)y.$$

влась по графикам потребляемой силы тока при известном напряжении в сети (380 В). Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 2, результаты эксперимента – в табл. 3.

Полученные графики зависимости и уравнения представлены на рис. 1-3.

Таким образом, из графиков и полученных уравнений очевидна зависимость от степени измельчения и влажности отходов. Составим уравнение зависимости данных показателей на основании средневзвешенных коэффициентов пропорциональности входных параметров (табл. 4).

$$a_{0\text{средневзв}} = \frac{879.222 \cdot 70 + 661.556 \cdot 50 + 468.556 \cdot 30}{70 + 50 + 30} = 724.5,$$

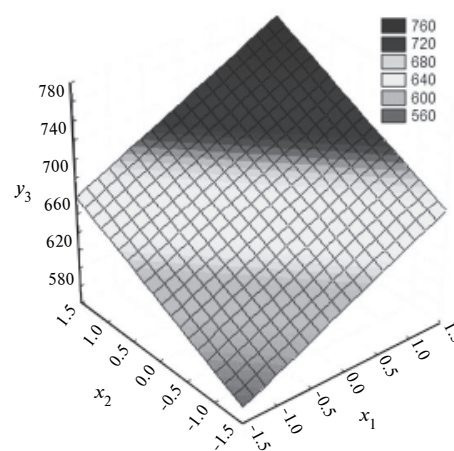


Рис. 2. Зависимость затрат энергии при дроблении древесных отходов от степени дробления и их влажности при размере кусков 50±5 см,

$$\text{модель: } y_3 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2;$$

$$z = (661.556) + (35.3333)x + (33.6667)y.$$

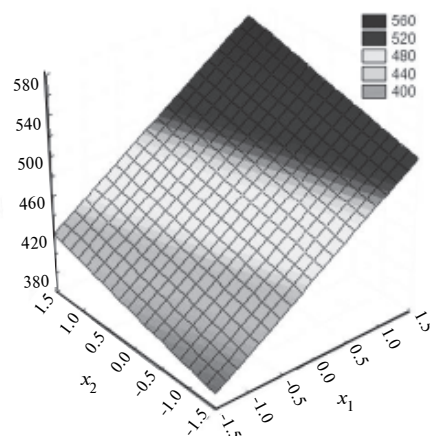


Рис. 3. Зависимость затрат энергии при дроблении древесных отходов от степени дробления и их влажности при размере кусков 30±5 см,

$$\text{модель: } y_4 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2;$$

$$z = (468.556) + (46.5)x + (14.8333)y.$$

Таблица 3. Результаты эксперимента по измельчению отходов

Номер опыта	Кодированные значения		Экспериментальные значения времени измельчения, с			Затраты энергии, Дж/кг		
	$X_1$	$X_2$	70±5 см	50±5 см	30±5 см	70±5 см	50±5 см	30±5 см
1	1	1	965	740	523	402	308	218
2	1	0	929	660	510	387	275	213
3	1	-1	908	660	498	378	275	208
4	0	1	950	730	489	396	304	204
5	0	0	910	690	480	379	288	200
6	0	-1	820	626	465	342	261	194
7	-1	1	836	628	436	348	262	182
8	-1	0	810	610	420	338	254	175
9	-1	-1	785	610	396	327	254	165

Таблица 4. Значения коэффициентов

Коэффициент	Экспериментальные значения			Средневзвешенное значение
	70±5 см	50±5 см	30±5 см	
$a_0$	879.222	661.556	468.556	724.5
$a_1$	61.833	35.333	46.500	49.9
$a_2$	39.667	33.667	14.833	32.7

Таблица 5. Данные для однофакторного эксперимента

№ опыта	Размер отходов до измельчения, см	Степень измельчения, раз	Затраты энергии, Дж/кг
1		23	820
2	70±5	35	910
3		70	950
4		17	626
5	50±5	25	690
6		50	730
7		10	465
8	30±5	15	480
9		30	489

$$a_{0\text{средневз}} = \frac{61.833 \cdot 70 + 35.333 \cdot 50 + 46.500 \cdot 30}{70 + 50 + 30} = 49.9,$$

$$a_{0\text{средневз}} = \frac{39.667 \cdot 70 + 33.667 \cdot 50 + 14.833 \cdot 30}{70 + 50 + 30} = 32.7.$$

Тогда уравнение зависимости примет вид:

$$Y = 724.5 + 49.9X_1 + 32.7X_2, \quad (5)$$

где  $Y$  – энергозатраты, Дж/кг,  $X_1$  – влажность отходов, %;  $X_2$  – степень измельчения отходов.

Из формулы (5) видно, что влажность отходов имеет большее значение, чем степень измельчения.

Для проверки адекватности полученных экспериментальных значений энергозатрат закону дробления Риттинера, Кирпичева-Кика и Бонда строились гра-

фики зависимости энергозатрат от степени измельчения по результатам эксперимента при нормальной влажности, равной 65 % (табл. 5).

Установлено, что наиболее точно процесс описывают логарифмическая, степенная и полиномиальная модели. Теоретически и экспериментально выявлено, что полученные значения энергозатрат в большей степени подчиняются закону дробления Кирпичева-Кика. Результаты работы будут использованы при установлении параметров работы фрезерной дробилки ДФК256/600У1 для обеспечения необходимой крупности частиц измельченного продукта.

#### Библиографический список.

1. Зимица Е. Л., Ульянова Н. В., Ващенко О. Д. // Хим. волокна. 2020. № 5. – С. 43-45.

2. Радюк А. Н., Буркин А.Н. // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). 2019. № 1-2. – С. 35-39.
3. Зими́на Е. Л., Коган А. Г., Ольшанский В. И. Технологические и теоретические основы получения материалов с использованием текстильных отходов: монография. – Витебск: ВГТУ, 2019. – 230 с.
4. Зими́на Е. Л., Скобова Н.В. и др. // Хим. волокна. 2019. № 1. – С. 23-25.
5. Резник Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов. – М.: Машиностроение, 1975. – 311 с.
6. Глебов И. Т. Резание древесины. – Екатеринбург: Уральский гос лесотехнич. ун-т, 2001. – 151 с.
7. Кулаженко Е. Л. // Вестник Витебского гос. технол. ун-та. 2009. Вып. 16. – С. 57-61.
8. Дмитриев С. В., Тихонов О. Н. // Обогащение руд. 2004. № 2. – С. 9-10.