

*В. М. Кравченко, С. Ю. Лозовая, Ю. А. Бондаренко*

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНОГО РОТОРА ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ РЕЗИНОВОЙ КРОШКИ \*

**Аннотация.** В настоящее время как вторичное сырье широко используется резиновая крошка размером 1–3 мм, которую получают после переработки резинотехнических изделий в горизонтальных измельчителях. При этом материал взаимодействует лишь с двумя или тремя режущими элементами, что вызывает необходимость применения многоступенчатого измельчения. Предлагается конструкция вертикального измельчителя со статором, имеющим клиновидные пазы, с вертикальным ротором, с изменяемой компоновкой регулировочных и режущих ножей с разным количеством зубьев. Получено адекватное уравнение регрессии зависимости максимального количества крошки в интервале 1–3 мм от основных факторов – толщины регулировочного ножа и увеличения количества режущих ножей. Исследования показали, что для получения 70–75 % резиновой крошки размером 1–3 мм целесообразно использовать ротор с 7 режущими ножами и 130 об/мин, тогда при толщине регулировочного ножа 2 мм преобладает фракция готового продукта 3 мм кубовидной формы, а при его толщине 10 мм преобладают частицы рваной формы 1 мм.

**Ключевые слова:** вертикальный измельчитель, фракция, резиновая крошка, уравнение регрессии, процентное содержание фракции резиновой крошки, частота вращения, режущий нож, регулировочный нож.

**Для цитирования:** Кравченко, В. М. Исследование работоспособности вертикального ротора измельчителя при получении резиновой крошки / В. М. Кравченко, С. Ю. Лозовая, Ю. А. Бондаренко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3. – С. 214–221. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_3\_214.

### **Введение**

В условиях возрастания экологических проблем переработка резинотехнических изделий становится стратегически важным направлением. Ежегодно в мире образуются миллионы тонн резиновых отходов, которые при традиционном захоронении на полигонах или сжигании наносят существенный вред окружающей среде [1, 2]. В настоящее время резиновая крошка, получаемая при переработке резинотехнических изделий, широко применяется в различных отраслях: для производства строительных материалов (кровельных, бесшовных и плиточных покрытий, шумо- и гидроизоляции), как компонент для дорожного строительства, в качестве сорбента для очистки водоёмов, как добавка в искусственный газон и т.д. [3, 4].

Существующие измельчители с горизонтальной компоновкой обладают рядом существенных недостатков, снижающих эффективность измельчения резинотехнических изделий. Одним из основных недостатков является то, что измельчаемый материал взаимодействует лишь с двумя или тремя режущими элементами за один проход, что вызывает необходимость использовать многоступенчатое измельчение. Это не только увеличивает энергозатраты, но и ухудшает качество готового продукта из-за получения до 25 % крошки размером менее 1 мм в готовом продукте, что не соответствует требованиям ГОСТ 8407–89 [5].

### **Основная часть**

Предлагается конструкция вертикального измельчителя (рис. 1, а), в котором реализован принципиально иной подход к переработке резинотехнических изделий. Его ключевыми конструктивными особенностями являются: статор с клиновидными пазами, вертикальный ротор с изменяемой компоновкой регулировочных и режущих ножей с разным количеством зубьев (рис. 1, б).

---

\* Работа выполнена в рамках Программы «Приоритет-2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.



**Рис. 1. Вертикальный измельчитель:**

*a* – общий вид вертикального измельчителя; *б* – рабочая зона вертикального измельчителя

Исследования проводились в лабораторной установке (см. рис. 1, *a*) с вертикальным ротором (рис. 2), расположенным внутри рабочей зоны и состоящим из вертикального вала, на котором размещены [6]: регулировочный нож, комплект режущих ножей с шайбами между ними, конусная втулка и шнек (сборка ротора осуществляется в порядке перечисления элементов).



**Рис. 2. Ротор вертикального измельчителя в сборе**

Для исследования изменения процентного содержания фракции  $K\%$  резиновой крошки размером 1–3 мм в готовом продукте использовался регрессионный анализ полнофакторного эксперимента рототабельного планирования второго порядка. В соответствии с принятым ПФЭ ЦКРП  $2^3$  установлено пять уровней варьирования (таблица), где основными факторами для получения резиновой крошки размером 1–3 мм являются:  $n$  – скорость вращения ротора 130–270 об/мин,  $z$  – количество режущих ножей ротора от 3 до 7 шт, зазор между которыми регулируется с помощью шайб толщиной 7,5–26 мм,  $z_b$  – толщина регулировочных ножей 2–10 мм.

#### Исследуемые факторы и уровни их варьирования ПФЭ ЦКРП $2^3$

Факторы	Обозначение	Единица измерения	Уровни варьирования				
			-1,68	-1	0	+1	+1,68
Количество режущих ножей $z$	$x_1$	шт.	3	4	5	6	7
Частота вращения ротора $n$	$x_2$	об/мин	130	160	200	240	270
Толщина регулировочных ножей $z_b$	$x_3$	мм	2	4	6	8	10

По результатам проведенных экспериментов получено адекватное уравнение регрессии в кодированном и декодированном виде:

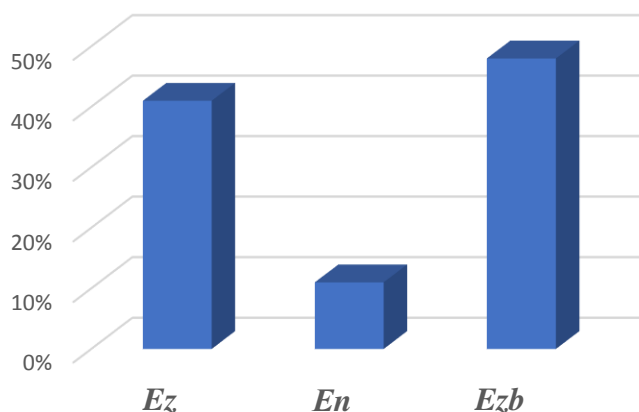
$$K\% = 56,7 + 4,4x_1 + 1,2x_2 + 5,2x_3 + 0,13x_1x_2 - 0,63x_1x_3 - 0,38x_2x_3 + 0,13x_1^2 + 0,41x_2^2 + 0,12x_3^2; \quad (1)$$

$$K_{\%} = 7 + 6,94z - 0,06n + 5,5z_b + 0,003zn - 0,32zz_b - 0,005nz_b - 0,13z^2 + 0,0003n^2 - 0,03z_b^2. \quad (2)$$

Анализ уравнения регрессии показал, что толщина регулировочного ножа  $x_3$  ( $z_b$ ) и количество режущих ножей  $x_1$  ( $z$ ) имеют наибольшее влияние на увеличение процентного содержания фракции 1–3 мм  $K_{\%}$  в крошке (рис. 3). Знак «+» указанных коэффициентов означает, что их увеличение повышает долю крошки данного размера. Однако отрицательный знак «-» коэффициента  $a_{13}$  при их совместном взаимодействии указывает на то, что при минимальных и максимальных совместных значениях могут увеличиваться доли частиц размером менее 1 мм или более 3 мм, что снизит процент частиц с необходимыми размерами. Для эффективного управления процессом важно учитывать не только индивидуальное влияние каждого параметра, но и их комбинированное воздействие, поскольку чрезмерное увеличение обоих факторов одновременно способно ухудшить выход целевой фракции [7].

Согласно линейным коэффициентам регрессии  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  влияние факторов на выходной параметр распределяется следующим образом:

- количество режущих ножей  $E_{a1} = 41 \%$ ;
- частота вращения ротора  $E_{a2} = 11 \%$ ;
- толщина регулировочного ножа  $E_{a3} = 48 \%$ .



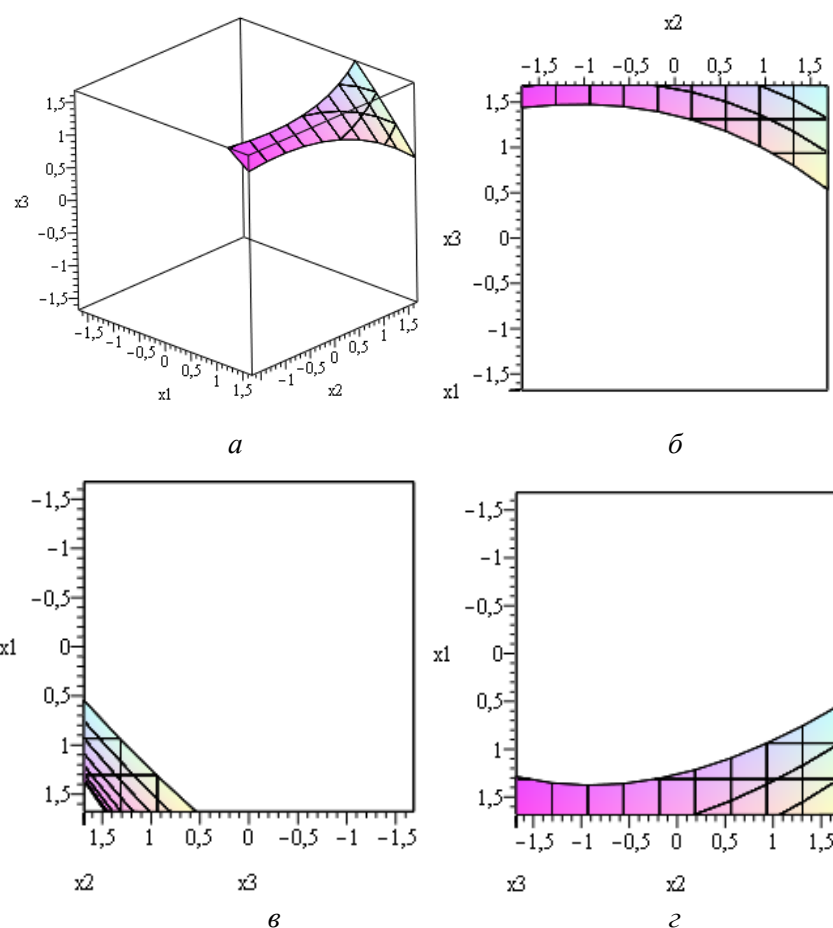
**Рис. 3. Значимость основных факторов для процентного содержания фракции 1–3 мм в измельченной крошке**

Согласно линейным коэффициентам регрессии доля фракции 1–3 мм в крошке в наибольшей степени зависит от толщины регулировочного ножа ( $E_{a3} = 48 \%$ ) и количества режущих ножей ( $E_{a1} = 41 \%$ ). Наименьшее влияние оказывает частота вращения ротора ( $E_{a2} = 11 \%$ ), значение которой в 4,4 и 3,7 раза меньше соответственно.

Особое внимание следует уделить коэффициенту совместного влияния факторов  $x_1 x_3$  ( $E_{a13} = 55 \%$ ). Он свидетельствует о том, что при одновременном использовании только  $a_1$  и  $a_2$  значений данных факторов их суммарное воздействие снизит содержание крошки требуемого размера ( $E_{a3} + E_{a1} - E_{a13} = 48 + 41 - 55$ ). Это связано с ростом доли переизмельченных частиц (< 1 мм) или недоизмельченных (> 3 мм), что ухудшает общее качество фракции крошки размером 1–3 мм.

С помощью аналитического пакета Maple 13 была построена 3D-поверхность (рис. 4, а), отражающая влияние основных факторов на содержание целевой фракции 1–3 мм в крошке, которая равна 75 %.

Метод регрессионного анализа позволяет прогнозировать рациональные параметры работы измельчителя для получения необходимой однородности фракции 1–3 мм путем построения поверхностей отклика для любых заданных условий. Данный аналитический подход определяет предельные значения конструктивных и технологических характеристик оборудования на основе математических моделей, исключая необходимость множества физических экспериментов [8].



**Рис. 4. Графики, отображающие:**

*a* – 3D поверхность зависимости максимального процентного содержания фракции 1–3 мм в крошке от изменения основных факторов; *б, в, г* – проекции поверхности (*a*) на оси  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  соответственно

Максимальное содержание фракции 1–3 мм в крошке, равное 75 %, можно получить при двух различных компоновках ротора:

- 1) в первом случае используется комплект из 6 режущих ножей с регулировочным ножом толщиной 10 мм в диапазоне частот вращения 240–270 об/мин;
- 2) во втором случае применяются 7 режущих ножей с регулировочными ножами толщиной 8 или 10 мм, что позволяет получить указанный результат независимо от частоты вращения ротора в варьируемом диапазоне.

На графиках (рис. 5) представлены зависимости максимального выхода фракции 1–3 мм ( $K_{\%}$ ) от количества режущих ножей ( $z = 3-7$  шт.) при фиксированных частотах вращения ротора ( $n = 130-270$  об/мин). Анализ показал, что все кривые подобных имеют возрастающий характер, при этом:

– при увеличении количества ножей с 3 до 7 процентное содержание фракции увеличивается в 1,2–1,6 раз, на что влияет толщина регулировочного ножа  $z_b$ , например, для частоты вращения ротора  $n = 130$  об/мин:

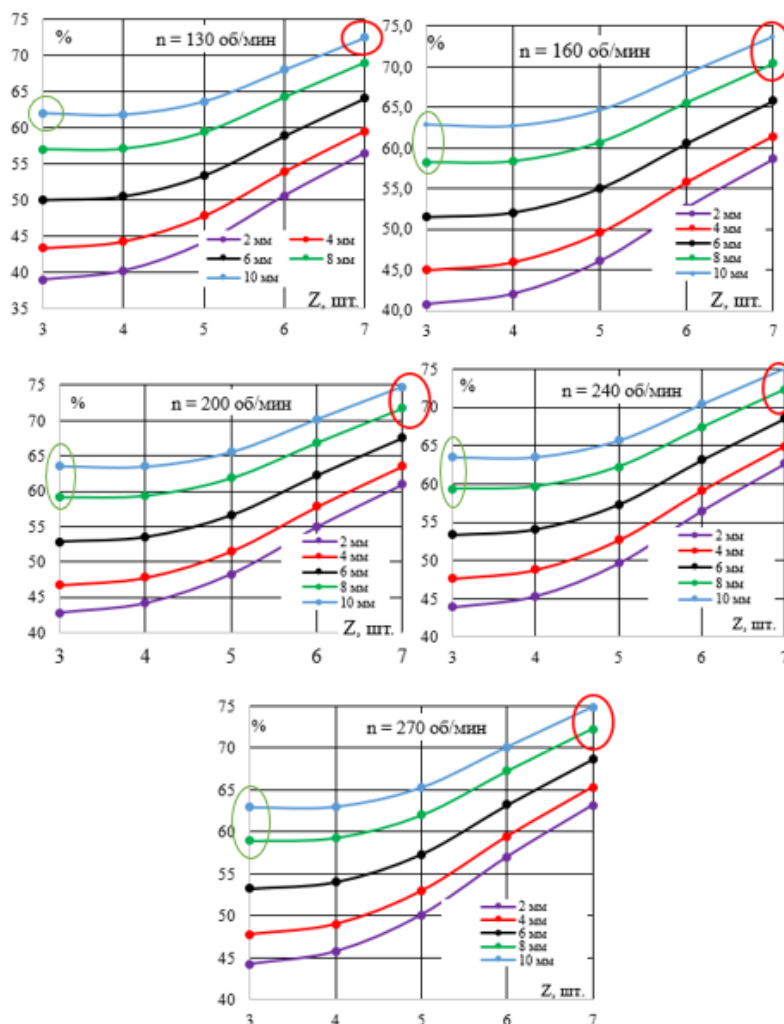
- а)  $z_b = 2$  мм,  $z = 3$  шт. –  $K_{\%} = 39$  %;
- б)  $z = 7$  шт. –  $K_{\%} = 51$  % в 1,5 раза;
- в)  $z_b = 10$  мм,  $z = 3$  шт. –  $K_{\%} = 62$  %;
- г)  $z = 7$  шт. –  $K_{\%} = 72$  % в 1,2 раза;

– при увеличении толщины регулировочного ножа с 2 до 10 мм процентное содержания фракции увеличивается:

- а) при  $n = 130$  об/мин и  $n = 270$  об/мин:
  - для 3 режущих ножей в 1,6 раза (39 % и 62 %) и в 1,4 раза (44 % и 63 %) соответственно;
  - для 7 режущих ножей 1,4 раза (56 % и 73 %) и в 1,2 раза (64 % и 75 %) соответственно;
- б) при  $n = 240$  об/мин и  $z_b = 10$  мм для 7 режущих ножей  $K_{\%} = 76$  %.

Количество крошки в интервале 1–3 мм, равное  $K_{\%} = 70-75$  %, можно получить на всем диапазоне изменения частоты вращения ротора при использовании 7 режущих ножей, при  $n = 130$  об/мин – только с

регулирующим ножом толщиной 10 мм ( $K_{\%} = 72\%$ ), а при других частотах вращения с регулирующими ножами толщиной 8, 10 мм, причем максимальное значение  $K_{\%} = 76\%$  получим при  $n = 240$  об/мин,  $z = 7$  шт,  $z_b = 10$  мм.



**Рис. 5. Графические структуры, показывающие зависимость максимального процентного содержания фракции 1–3 мм  $K_{\%}$  в крошке в зависимости от количества режущих ножей  $z$  при фиксированном значении частоты вращения ротора  $n$ :**

- – процентное содержание крошки рванной формы;
- – процентное содержание крошки кубовидной формы

Таким образом, вертикальный ротор с набором горизонтально установленных режущих и регулируемых ножей позволяет создать стадийное измельчение в одном аппарате, повышая его эффективность [9]. Дополнительную роль играют разделительные шайбы, расширяющие рабочую зону и предотвращающие образование застойных зон. Взаимодействие материала с клиновидными пазами и ребрами статора способствует более точному разделению частиц по размеру, минимизируя образование брака – фракция менее 1 мм, а изменение толщины регулируемого ножа от 2 до 10 мм позволяет управлять фракционным составом резиновой крошки в диапазоне 1–3 мм: при минимальной толщине преобладает крупная фракция готового продукта 3 мм, имеющая кубовидную форму, а при максимальной толщине – более мелкая фракция 1 мм, имеющая рваную форму [10].

### Выводы

Переработка резинотехнических изделий является одной из актуальных задач в условиях экологических проблем. Одним из наиболее эффективных методов утилизации является механическое измельчение, позволяющее получать резиновую крошку для дальнейшего её применения в строительных изделиях, дорожных покрытиях, покрытиях спортивных площадок и т.д., при этом следует отметить их

высокие эксплуатационные характеристики. Таким образом, механическое измельчение не только сокращает объемы отходов, но и способствует созданию качественных вторичных продуктов.

Существующие горизонтальные измельчители имеют низкую эффективность однородности готового продукта из-за ограниченного взаимодействия материала с режущими элементами, вследствие чего требуется увеличение многостадийности переработки, что существенно повышает энергоёмкость переработки резинотехнических изделий.

Предложена конструкция измельчителя с вертикальным расположением ротора, что позволит обеспечить необходимое значение резиновой крошки 70 % и более фракцией 1–3 мм и одновременно снизить содержание некондиционной фракции до 12–15 %. Это не только соответствует нормативным требованиям, но и сокращает энергопотребление за счёт уменьшения числа переработок.

Для получения крошки фракцией 1–3 мм свыше 70 % рациональным является использование набора режущих элементов в количестве 7 штук толщиной 2 мм каждый, толщина регулировочного ножа составляет 10 мм, при этом в крошке преобладают частицы размером ближе к 1 мм. Если количество ножей более 7 штук, это приводит к переизмельчению материала, т.е. увеличению частиц менее 1 мм, что нежелательно. Кроме того, использование более 7 ножей увеличивает время транспортировки измельченного материала к выгрузочному желобу, что приводит к переизмельчению. В то время как при использовании 3 ножей и регулировочного ножа толщиной 10 мм можно получить крошку фракцией 1–3 мм 63–64 %, при этом существенно увеличивается доля частиц 3 мм и более крупных.

В результате анализа установлено, что толщина режущего ножа является одним из ключевых параметров, определяющим форму частиц готового продукта. При использовании регулировочного ножа толщиной 2–4 мм формируются преимущественно кубовидные частицы, которые применяют для производства высококачественных резиновых покрытий, создания изделий методом литья под давлением (парковочные столбики, бордюры и др.), в качестве модификации битумов, бетонных смесей и т.д. Увеличение толщины ножа до 10 мм приводит к образованию частиц «рваной» формы, которые используются для производства рулонных покрытий для беговых дорожек, стадионов, спортивных и детских площадок, изготовления шумоизоляционных материалов, как добавка в верхние слои асфальтовых покрытий, а также для производства покрытий типа «искусственная трава», кровельных материалов и других аналогичных изделий.

Таким образом, установка представляет интерес для промышленного внедрения, позволит повысить экономическую и технологическую эффективность переработки резинотехнических отходов.

В результате анализа полученного уравнения регрессии зависимости максимального количества крошки фракции 1–3 мм ( $K\%$ ) от изменения основных факторов (частота вращения ротора  $n$ , количество режущих ножей  $z$ , толщина регулировочного ножа  $zb$ ), установлено, что значимость основных факторов по коэффициентам  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  линейной регрессии распределяется следующим образом: количество режущих ножей  $Ea_1 = 41\%$ ; частота вращения ротора  $Ea_2 = 11\%$ ; толщина регулировочного ножа на выходе  $Ea_3 = 48\%$ .

### Список литературы

- 1 ГОСТ Р 54095–2010. Ресурсосбережение. Требования к экобезопасной утилизации отработавших шин : национальный стандарт Российской Федерации : утвержден Приказом Росстандарта : введен 2012-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 36 с.
- 2 Проблемы утилизации крупногабаритных автомобильных шин / В. Я. Дуганов, Т. А. Дуюн, К. В. Чуев [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2023. – № 11. – С. 103–112. – DOI 10.34031/2071-7318-2023-8-11-103-112.
- 3 Резаев, Е. И. Проект по переработке изношенных автомобильных шин и резиновых технических изделий в резиновую крошку / Е. И. Резаев, Ч. О. Тюлюш, Е. В. Баженова // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2013. – Т. 2, № 9. – С. 130–132.

### References

- 1 GOST R 54095–2010. Resource conservation. Requirements for environmentally friendly disposal of used tires : national standard of the Russian Federation : approved. by the Order of Rosstandart : introduced on 2012-01-01. – Moscow : Standartinform, 2019. – 36 p.
- 2 Problems of recycling large-sized automobile tires / V. Ya. Duganov, T. A. Duyun, K. V. Chuev [et al.] // Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov. – 2023. – No. 11. – P. 103–112. – DOI 10.34031/2071-7318-2023-8-11-103-112.
- 3 Rezaev, E. I. Project for processing worn-out automobile tires and rubber technical products into rubber crumb / E. I. Rezaev, Ch. O. Tyulyush, E. V. Bazhenova // Actual problems of aviation and cosmonautics. – 2013. – Vol. 2, No. 9. – P. 130–132.

- 4 **Кизиниевич, О. А.** Применение резиновой крошки в производстве строительной керамики / О. А. Кизиниевич, В. Г. Кизиниевич, Д. Р. Забулис // Стекло и керамика. – 2011. – № 7. – С. 25–28. – ISSN 0131-9582.
- 5 **ГОСТ 8407–89.** Сырье вторичное резиновое. Покрышки и камеры шин. Технические условия : межгосударственный стандарт : введен 01.01.1991. – Москва : Издательство стандартов, 1989. – 12 с.
- 6 Моделирование кинематики частиц с наборным многолезвийным инструментом при переработке резинотехнических изделий / С. Ю. Лозовая, А. Н. Афонин, В. М. Кравченко, Я. П. Топчий // Современные наукоемкие технологии. – 2023. – № 12–1. – С. 40–45. – DOI 10.17513/snt.39858.
- 7 Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента : учебное пособие / Н. А. Спиринов, В. В. Лавров, Л. А. Зайнуллин [и др.] ; под общей редакцией Н. А. Спиринова. – Екатеринбург : ООО «УИНЦ», 2015. – 290 с. – ISBN 978-5-9904848-4-9.
- 8 **Любимова, О. Н.** Построение и проверка регрессионных моделей при обработке результатов факторных экспериментов : для студентов, обучающихся по направлению «Прикладная механика» : практикум / составители О. Н. Любимова, В. В. Сиськов ; Инженерная школа ДВФУ. – Владивосток : Дальневосточный федеральный университет, 2017. – 36 с. – ISBN 978-5-7444-4100-5.
- 9 **Лозовая, С. Ю.** Моделирование перемещения частиц в двухстадийном измельчителе в зависимости от его технологических параметров / С. Ю. Лозовая, В. М. Кравченко // СТИН. – 2022. – № 3. – С. 24–27. – ISSN 0869-7566.
- 10 **Патент RU 224979 U1, МПК D02C 18/00 (2006.01).** Двухстадийный измельчитель для переработки техногенных отходов : полезная модель : № 2024102933 : заявл. 06.02.2024 : опубл. 10.04.2024 / В. М. Кравченко, С. Ю. Лозовая, П. Г. Солодков, Я. П. Топчий ; патентообладатель ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова». – 10 с.
- 4 **Kizinyevich, O. A.** Application of rubber crumb in the production of building ceramics / O. A. Kizinyevich, V. G. Kizinyevich, D. R. Zabulis // Glass and ceramics. – 2011. – No. 7. – P. 25–28. – ISSN 0131-9582.
- 5 **GOST 8407–89.** Secondary rubber raw materials. Tires and tire inner tubes. Technical conditions : interstate standard : introduced on 01.01.1991. – Moscow : Publishing house of standards, 1989. – 12 p.
- 6 Modeling of particle kinematics with a multi-blade tool in the processing of rubber products / S. Yu. Lozovaya, A. N. Afonin, V. M. Kravchenko, Ya. P. Topchiy // Modern science-intensive technologies. – 2023. – No. 12–1. – P. 40–45. – DOI 10.17513/snt.39858.
- 7 Methods of planning and processing the results of an engineering experiment : a tutorial / N. A. Spirin, V. V. Lavrov, L. A. Zainullin [et al.] ; edited by N. A. Spirin. – Ekaterinburg : LLC “UINC”, 2015. – 290 p. – ISBN 978-5-9904848-4-9.
- 8 **Lyubimova, O. N.** Construction and verification of regression models when processing the results of factorial experiments : for students studying in the direction of “Applied Mechanics” : practical course / compiled by O. N. Lyubimova, V. V. Siskov ; FEFU School of Engineering. – Vladivostok : Far Eastern Federal University, 2017. – 36 p. – ISBN 978-5-7444-4100-5.
- 9 **Lozovaya, S. Yu.** Modeling of particle movement in a two-stage grinder depending on its technological parameters / S. Yu. Lozovaya, V. M. Kravchenko // STIN. – 2022. – No. 3. – P. 24–27. – ISSN 0869-7566.
- 10 **Patent RU 224979 U1, IPC D02C 18/00 (2006.01).** Two-stage shredder for processing man-made waste : utility model : No. 2024102933 : declared 06.02.2024 : published 10.04.2024 / V. M. Kravchenko, S. Yu. Lozovaya, P. G. Solodkov, Ya. P. Topchy ; patent holder FSBEI of HE “Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov”. – 10 p.

*V. M. Kravchenko, S. Yu. Lozovaya, Yu. A. Bondarenko*

#### **INVESTIGATION OF THE OPERABILITY OF THE VERTICAL ROTOR OF THE SHREDDER DURING THE PRODUCTION OF RUBBER CRUMB**

**Abstract.** Recently, rubber crumb, 1–3 mm in size, obtained from processing rubber products in horizontal shredders, is currently widely used as a secondary raw material. In this case, the material interacts with only two or three cutting elements, which necessitates the use of multi-stage shredding. The design of a vertical shredder with a stator having wedge-shaped grooves, with a vertical rotor, with a variable arrangement of adjusting and cutting knives with different numbers of teeth is proposed. An adequate regression equation has been obtained for the dependence of the maximum amount of crumbs in the range of 1–3 mm on the main factors – the thickness of the adjusting knife and the increase in the number of cutting knives. Studies have shown that to obtain 70–75 % of a 1–3 mm rubber crumb, it is advisable to use a rotor with 7 cutting knives and

130 rpm, whereas with a 2 mm thick adjusting knife, a 3 mm cuboid fraction of the finished product prevails, and with a 10 mm thickness, 1 mm ragged particles predominate.

**Keywords:** vertical shredder, fraction, rubber crumb, regression equation, percentage of rubber crumb fraction, rotation speed, cutting knife, adjusting knife.

**For citation:** Kravchenko, V. M. Investigation of the operability of the vertical rotor of the shredder during the production of rubber crumb / V. M. Kravchenko, S. Yu. Lozovaya, Yu. A. Bondarenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 3. – P. 214–221. – DOI 10.46973/0201–727X\_2025\_3\_214.

#### Сведения об авторах

**Кравченко Владимир Михайлович**

Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова (БГТУ), кафедра механического оборудования, аспирант,  
e-mail: livenec.vova@mail.ru

**Лозовая Светлана Юрьевна**

Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова (БГТУ), кафедра механического оборудования, доктор технических наук, профессор,  
e-mail: Lozwa@mail.ru

**Бондаренко Юлия Анатольевна**

Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова (БГТУ), кафедра технологии машиностроения, доктор технических наук, профессор,  
e-mail: kdsm2002@mail.ru

#### Information about the authors

**Kravchenko Vladimir Mikhailovich**

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU), Chair of Mechanical Equipment, Postgraduate Student,  
e-mail: livenec.vova@mail.ru

**Lozovaya Svetlana Yuryevna**

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU), Chair of Mechanical Equipment, Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
e-mail: Lozwa@mail.ru

**Bondarenko Yulia Anatolyevna**

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU), Chair of Engineering Technology, Doctor of Engineering Sciences, Professor,  
e-mail: kdsm2002@mail.ru