

С. Ю. Лозовая, В. П. Воронов, В. М. Кравченко

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ РАБОЧИМ ОРГАНОМ С ИЗМЕНЯЕМОЙ КОМПОНОВКОЙ НОЖЕЙ *

Аннотация. Рассмотрен процесс переработки резинотехнических изделий рабочим органом с изменяемой компоновкой ножей. Установлено, что для повышения стадийности измельчения наиболее эффективно использовать устройство с вертикальным расположением рабочего органа. Систематизированы сферы использования резиновой крошки: производство строительных материалов, компонентов для дорожного строительства, применение в качестве регенерата и др. Ввиду недостаточной изученности в целом вопросов измельчения эластомеров, например резины, и отсутствия устоявшихся теоретических подходов к данному процессу, целесообразно в математическом описании рассматривать разрушение резины в крошку с точки зрения ее вторичного использования в другом изделии. То есть рассматривать именно механизм получения крошки, а не процесс резания, характерный для механической обработки, целью которого является придание формы изделию. На основе геометрического и энергетического анализа произведено математическое описание зоны предразрушения перед фронтом зуба. Получено выражение коэффициента объемного расширения зоны уплотнения, определена минимальная частота вращения ротора, обеспечивающая эффективное отделение частицы. Установлено влияние технологических параметров (скорости вращения ω , количества режущих ножей z , толщины регулировочного ножа z_b) на мощность измельчения и морфологию частиц.

Ключевые слова: резинотехнические изделия, рабочий орган, эластомеры, вторичная переработка, зона уплотнения, коэффициент объемного расширения, работа деформации, мощность, математическое описание, изменяемая компоновка ножей.

Для цитирования: Лозовая, С. Ю. Математическое описание процесса переработки резинотехнических изделий рабочим органом с изменяемой компоновкой ножей / С. Ю. Лозовая, В. П. Воронов, В. М. Кравченко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1. – С. 195–202. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_195.

Введение

Ежегодно в мире образуются миллионы тонн резиновых отходов, основная масса которых направляется на полигоны для хранения, что приводит к долгосрочному загрязнению окружающей среды [1], в связи с чем проблема утилизации и переработки изношенных резинотехнических изделий вызывает повышенный интерес со стороны научного сообщества, прежде всего с экологической и экономической точки зрения. Одним из наиболее перспективных направлений переработки резинотехнических изделий является их измельчение механическим способом в устройстве с вертикальным рабочим органом для повышения стадийности измельчения [2]. В результате получается резиновая крошка, используемая в различных сферах, например в производстве строительных материалов (кровельные, бесшовные и плиточные покрытия, шумо- и гидроизоляция и др.), в качестве компонента для дорожного строительства, сорбента для очистки водоемов от нефтепродуктов и др. [3].

Эффективность процесса измельчения в значительной степени определяется физическими свойствами материала и взаимодействием режущего инструмента с ним. Несмотря на существование ряда эмпирических моделей эластомеров, вопрос математического описания связи параметров зоны уплотнения при внедрении зуба ножа, частоты его вращения и свойств резины практически не изучен. Поэтому теоретическое описание изменения материала при воздействии на него рабочего органа имеет важное прикладное значение для проектирования энергоэффективного оборудования с управляемым размером и формой конечного продукта – резиновой крошкой [4]. В основе математического описания лежит

* Исследование выполнено в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

предположение о том, что резиновые изделия являются материалом измельчение которого сопровождается значительной объемной деформацией в области контакта с инструментом. Формирование зоны уплотнения (зоны предразрушения) является основным фактором, определяющим энергозатраты на измельчение, износ инструмента и, что особенно важно, форму и размер получаемых частиц.

Основная часть

Для математического описания процесса измельчения резинотехнических изделий в крошку с целью их вторичного использования в качестве сырья для новых изделий рассматривается механизм разрушения материала. В отличие от механической обработки резанием, целью которой является придание формы изделию [5], в данном случае исследуется именно механизм образования резиновой крошки. При внедрении зуба инструмента в резиновый образец наблюдаются следующие этапы и особенности разрушения материала исследования [6, 7]:

1 Начальный этап характеризуется упругим поведением – при снятии нагрузки след от инструмента исчезает, а глубина внедрения линейно зависит от усилия до достижения предела упругости.

2 При превышении критической нагрузке наступает фаза необратимых изменений. В материале происходят сложные структурные преобразования.

3 Завершающая стадия – окончательное разрушение, при котором микронадрезы объединяются в единую трещину. Развитие этой трещины происходит вдоль режущей кромки, по сути формирует поверхность разрушения. Для резины характерно образование частиц (крошки) без пластической деформации – трещина точно следует траектории движения инструмента, таким образом образуется крошка «кубовидной» формы (рис. 1, *а*).

При уменьшении глубины внедрения зуба ножа в измельчаемый материал до значений, равных или меньших по сравнению с радиусом скругления кромки ножа инструмента, механизм взаимодействия меняется. Вместо классического резания зуб начинает вдавливаясь и проскальзывать по поверхности. Когда силы трения превышают прочностные характеристики материала, в поверхностном слое возникают поперечные трещины. Развитие этих трещин запускает механизм разрушения, известный как «истирание с отрывом», то есть происходит постепенное отдираание поверхностного слоя с образованием частиц «рваной» формы (рис. 1, *б*).



Рис. 1. Резиновая крошка, полученная в результате переработки с использованием вертикального рабочего органа:

а – «кубовидная» форма; *б* – «рваная» форма

Математическое описание процесса измельчения резинотехнических отходов разработано для измельчителя вертикального типа [8], основным рабочим органом которого является ротор с режущими и регулировочными ножами. В качестве последних используются дисковые отрезные фрезы по ГОСТ 2679–2014 [9] с внешним диаметром 125 мм и толщиной 2 мм (толщина ножа равна толщине зуба). Конструкция ротора предусматривает последовательный монтаж элементов на вертикальном валу (регулирующий нож, комплект режущих ножей с разделительными шайбами, конусная втулка). Частота вращения ротора n при измельчении изменяется в пределах 130–270 мин⁻¹. Количество режущих ножей z варьируется от 3 до 6 шт. Толщина регулировочного ножа z_b на выходе может составлять 2, 4, 6, 8 или 10 мм (комплектация от 1 до 5 ножей соответственно, рис. 2). Данные параметры изменяются в зависимости от размера измельчаемого материала и требований к готовому продукту.

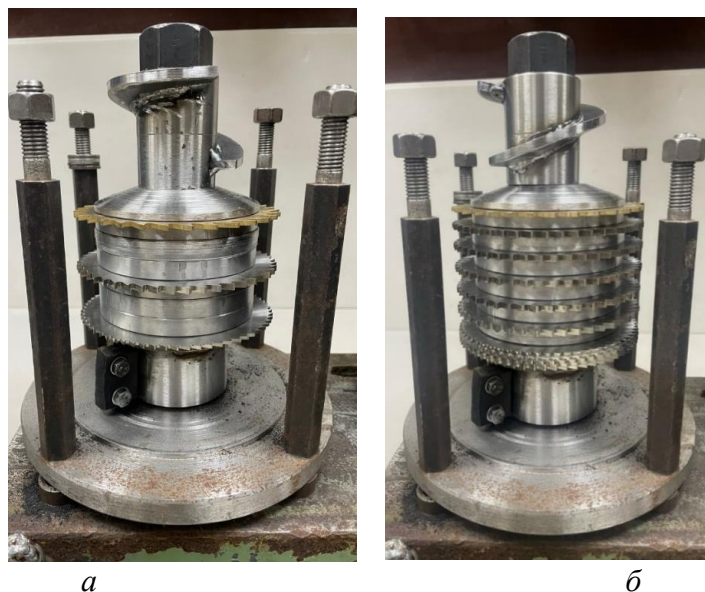


Рис. 2. Ротор измельчителя вертикального типа в сборе:
а – минимальная компоновка; *б* – максимальная компоновка

В основе математического описания разрушения резинового массива (рис. 3) лежит гипотеза о том, что объем зоны уплотнения V_0 , формируемой зубом ножа в массиве резины, до момента отрыва частицы может быть аппроксимирован как объем цилиндра. Это допущение условно для случая, когда расстояние резания значительно превышает толщину среза. Определим максимальное напряжение резания:

$$\sigma_m = \frac{\beta \cdot E \cdot W}{3(1-2\nu)} > [\sigma_r], \quad (1)$$

где W – энергия, вводимая зубом режущего ножа в массив резины, Дж;
 E – модуль Юнга, МПа;
 ν – коэффициент Пуассона;
 $[\sigma_r]$ – допустимый предел прочности резины на растяжение, МПа;
 β – коэффициента объемного расширения зоны уплотнения:

$$\beta = \frac{2\nu}{S \cdot E \cdot \Delta l} \quad (2)$$

Δl – путь, пройденный зубом ножа, м:

$$\Delta l = R \Delta \alpha, \quad (3)$$

R – радиус ножа, м;

$\Delta \alpha$ – угол поворота зуба режущего ножа, рад;

S – площадь контакта зуба режущего ножа с массивом резины, м²:

$$S = \frac{A_1^2 \alpha^2}{4\pi}, \quad (4)$$

α – угол между зубьями ножа, рад;

A_1 – ширина зуба ножа, м.

Выражения (1)–(4) получены на основе геометрического и термодинамического анализа процесса разрушения резины при внедрении зуба ножа. Выражение (1) для максимального напряжения в зоне уплотнения следует из условия экстремума работы разрушения, найденного с использованием энергетического баланса и физико-механических характеристик материала (модуль Юнга, коэффициент Пуассона). Коэффициент объемного расширения β (2) выведен из предположения о цилиндрической форме зоны уплотнения, что позволило связать изменение ее объема с деформациями через коэффициент Пуассона. Величина Δl (3) представляет собой путь, пройденный зубом, и определяется радиусом ножа и углом поворота. Площадь контакта зуба с материалом S (4) рассчитана исходя из геометрических параметров зуба (ширина A_1) и углового шага зубьев α .

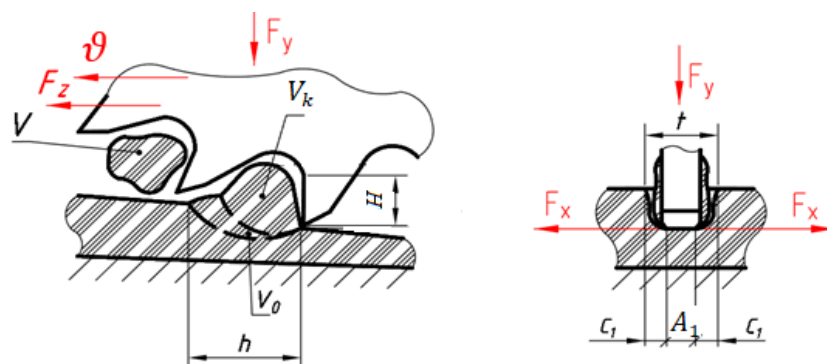


Рис. 3. Схематическое изображение процесса разрушения модели резинового массива

Найдено выражение для работы A_p , затрачиваемой на деформацию и разрушение материала в зоне уплотнения и необходимой для отделения одной частицы объемом V_k .

$$A_p = \frac{2\nu \cdot W_0 \cdot \sigma_r \cdot V_k}{E \cdot R \cdot \Delta l \cdot A_1} - \frac{3(1-2\nu) \cdot S \cdot \sigma_r^2 \cdot V_k^2 \cdot k^2}{2 \cdot E \cdot H \cdot A_1^2 \cdot R^2 \cdot \alpha^2}, \quad (5)$$

где V_k – объем частицы, отрезаемый зубом ножа, м³;

k – коэффициент, учитывающий форму отрезаемого объема, $k_0 = \frac{\pi}{6}$, $k_{\square} = 1$;

σ_r – предел прочности резины на растяжение, МПа;

H – высота зуба ножа, м.

Выражение A_p описывает два различных режима разрушения резинового образца. Если значение коэффициента Пуассона материала близко к 0,5, что указывает на его практически несжимаемые свойства, то вторая часть выражения обращается в ноль. В этом случае первая часть формулы отвечает за процесс чистого резания, приводящий к образованию частиц «кубовидной» формы. Но если же коэффициент Пуассона менее 0,5, то наличие второй части выражения указывает на истирание в процессе измельчения. Этот режим запускает механизм разрушения с развитием трещин, известный как «истирание с отрывом» [6, 7], при котором происходит постепенное отдираание поверхностного слоя с образованием частиц «рваной» формы.

Из условия физической реализуемости процесса, когда $A_p > 0$ (5), следует, что энергия W_0 , вводимая зубом, должна превышать некоторое пороговое значение W_p , тогда:

$$W_0 \geq \frac{3(1-2\nu) \cdot S \cdot V_k \cdot k \cdot \sigma_r}{4\nu \cdot H \cdot A_1 \cdot \alpha}. \quad (6)$$

Энергию W_0 также можно определить через кинетическую энергию зуба:

$$W_0 = \frac{\rho V_3}{2} R^2 \cdot \omega^2, \quad (7)$$

где ρ – плотность материала ножа, кг/м³;

V_3 – объем одного зуба, м³;

ω – частота вращения рабочего органа, с⁻¹.

Подставляя (6) в (7), находим выражение для минимальной угловой скорости, обеспечивающей разрушение:

$$\omega_r = \left(\frac{3(1-2\nu)}{2\nu} \cdot \frac{V \cdot k}{V_3} \cdot \frac{S \cdot \sigma_r}{\rho \cdot R^2 \cdot H \cdot A_1 \cdot \alpha} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

Максимальная работа A_{\max} и мощность P_{\max} , затрачиваемая на процесс измельчения, рассчитываются по формулам:

$$A_{\max} = \frac{\nu^2 \cdot H \cdot \rho^2 \cdot V_3^2 \cdot R^2 \cdot \omega^4}{6(1-2\nu) \cdot S \cdot E \cdot \alpha^2}, \quad (9)$$

$$P_{\max} = A_{\max} \cdot \omega \cdot z, \quad (10)$$

где z – количество режущих ножей, шт.

Таким образом, получено выражение мощности, затрачиваемой на процесс измельчения $P_{\text{изм}}$ через максимальную работу (рис. 4) [10, 11], на основании которого построены графики при изменении частоты вращения рабочего органа $\omega = 13,6\text{--}28,3 \text{ с}^{-1}$, прочности резины на растяжение $\sigma_r = 8\text{--}12 \text{ МПа}$ и толщины регулировочного ножа $z_b = 2\text{--}10 \text{ мм}$ при максимальном количестве режущих ножей $z = 7 \text{ шт.}$ [4].

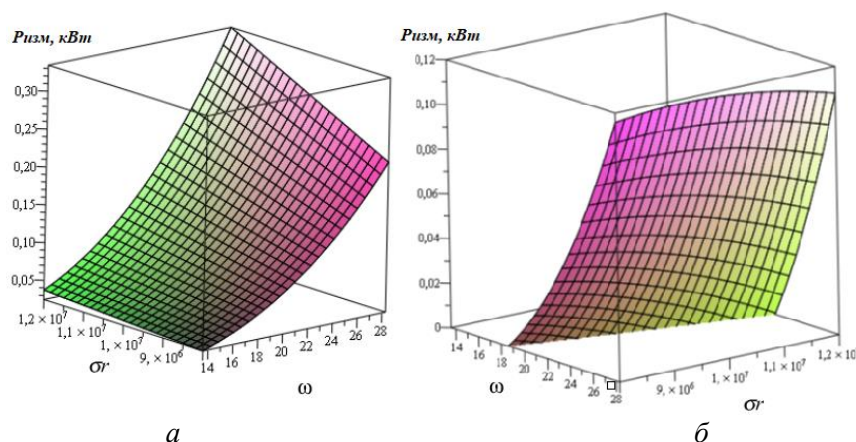


Рис. 4. Зависимость мощности измельчения $P_{\text{изм}}$ от частоты вращения ω и предела прочности σ_r при толщине регулировочного ножа:

$a - z_b = 2 \text{ мм}; б - z_b = 10 \text{ мм}$

Установлено, что:

1 Максимальная мощность, затрачиваемая на измельчение, при минимальной толщине регулировочного ножа $z_b = 2 \text{ мм}$ составляет $P_{\text{изм}} = 0,334 \text{ кВт}$ при максимальной частоте вращения рабочего органа $\omega = 28,3 \text{ с}^{-1}$ и максимальном допустимом значении предела прочности на растяжение материала $\sigma_r = 12 \text{ МПа}$. При частоте вращения $\omega = 13,6 \text{ с}^{-1}$ и минимальном $\sigma_r = 8 \text{ МПа}$, мощность, затрачиваемая на измельчение, тоже имеет минимальное значение $P_{\text{изм}} = 0,250 \text{ кВт}$. В исследованном диапазоне условий реализуется процесс резания, обеспечивающий образование «кубовидной» крошки (см. рис. 1, а).

2 Максимальная мощность, затрачиваемая на измельчение, при максимальной толщине регулировочного ножа $z_b = 10 \text{ мм}$ составляет $P_{\text{изм}} = 0,119 \text{ кВт}$ при максимальной частоте вращения рабочего органа $\omega = 28,3 \text{ с}^{-1}$ и максимальном значении предела прочности на растяжение материала $\sigma_r = 12 \text{ МПа}$. При частоте вращения $\omega = 13,6 \text{ с}^{-1}$ и минимальном $\sigma_r = 8 \text{ МПа}$, мощность, затрачиваемая на измельчение, тоже имеет минимальное значение $P_{\text{изм}} = 0,113 \text{ кВт}$. Увеличение толщины регулировочного ножа при низкой частоте вращения рабочего органа приводит к снижению энергозатрат по сравнению с использованием ножа минимальной толщины. Это объясняется увеличением площади среза, что снижает требуемое удельное усилие благодаря свойствам измельчаемого материала и уменьшает объем зоны уплотнения, где доминирующее влияние оказывает объемная деформация, а частицы получают «рваной» формы (см. рис. 1, б).

Анализ результатов экспериментальных исследований [4] позволил выявить связь между режимами работы измельчителя и формой получаемых частиц резиновой крошки, при этом установлено, что:

а) при толщине регулировочного ножа $z_b = 2 \text{ мм}$ и частоте вращения рабочего органа $\omega = 28,3 \text{ с}^{-1}$ образуется «кубовидная» крошка размером 1–3 мм (см. рис. 1, а), в готовом продукте увеличивается количество частиц «кубовидной» формы с преобладающей фракцией 3 мм. Высокая скорость воздействия режущего органа при минимальной толщине регулировочного ножа обеспечивает быстрое и локализованное внедрение зуба, при котором процесс приближается к чистому резанию. Мощность расходуется преимущественно на формирование новой поверхности, а не на объемную деформацию, что минимизирует пластическое течение материала по краям среза и производит однородные по форме частицы (см. рис. 1, а);

б) при толщине регулировочного ножа $z_b = 10 \text{ мм}$ и частоте вращения рабочего органа $\omega = 13,6 \text{ с}^{-1}$ образуется «рваная» крошка размером 1–3 мм (см. рис. 1, б), что в готовом продукте увеличивает количество частиц «рваной» формы с преобладающей фракцией 1 мм из-за максимальной толщины режущего ножа и минимальной частоты вращения рабочего органа. Физическая интерпретация данного процесса заключается в доминировании механизмов разрыва и сдвига над чистым резанием. Снижение скорости и увеличение толщины регулировочного ножа способствуют многократной деформации материала перед его разрушением, что и формирует «рваные» края частиц (см. рис. 1, б).

Заключение

Предложено математическое описание разрушения резинотехнических изделий при воздействии вертикального рабочего органа.

Получено выражение для работы A_p , необходимой для отделения частицы, которое описывает два режима разрушения в зависимости от значения коэффициента Пуассона. Если последний близок к 0,5, процесс сводится к чистому резанию с образованием «кубовидных» частиц. Если коэффициент менее 0,5, то преобладает режим «истирания с отрывом», приводящий к образованию частиц «рваной» формы.

Мощность, затрачиваемая на измельчение $P_{изм}$, в исследованном диапазоне параметров имеет прямую зависимость от частоты вращения и предела прочности на растяжение, где $\omega = 13,6\text{--}28,3 \text{ с}^{-1}$ и $\sigma_r = 8\text{--}12 \text{ МПа}$. Так, при минимальной толщине ножа $z_b = 2 \text{ мм}$ и при максимальных ω и σ_r максимальная мощность, затрачиваемая на измельчение, $P_{изм} = 0,334 \text{ кВт}$. При данных условиях реализуется режим резания, обеспечивающий кубовидную форму частиц.

Увеличение толщины ножа до $z_b = 10 \text{ мм}$ приводит к снижению энергозатрат на измельчение $P_{изм} = 0,119 \text{ кВт}$ вследствие роста площади среза и снижения удельного усилия растяжения. Данный режим характеризуется уменьшенным влиянием объемной деформации в зоне уплотнения, однако формирует частицы «рваной» формы.

Выводы

Анализ результатов экспериментальных исследований подтверждает связь между режимами измельчения и морфологией частиц: использование максимальной толщины ножа при минимальной частоте вращения рабочего органа приводит к доминированию механизмов разрыва и сдвига, формирующих «рваную» крошку с преобладанием фракции 1 мм. И наоборот, сочетание минимальной толщины ножа с максимальной частотой вращения обеспечивает условия, близкие к чистому резанию, при котором энергия расходуется преимущественно на образование новой поверхности, что минимизирует пластическую деформацию и позволяет получать «кубовидную» крошку с преобладанием фракции 3 мм.

Список литературы

1 Об утверждении требований при обращении с группами однородных отходов I–V классов опасности : приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 11 июня 2021 г. № 399 (ред. от 04.04.2023) // Официальный интернет-портал правовой информации. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202111300043> (дата обращения: 15.03.2026).

2 **Lozovaya, S. Yu.** Investigation of particle kinematics and strength characteristics of a set of multi-knife tools for the disposal of rubber products / S. Yu. Lozovaya, Ya. P. Topchy, V. M. Kravchenko // Practice Oriented Science : UAE – Russia – India : proceedings of the International university scientific forum. – UAE, 2024. – P. 140–144. – DOI 10.34660/INF.2024.39.26.047.

3 **Соловьев, Е. М.** Применение измельченной резиновой крошки в изделиях резиновой промышленности / Е. М. Соловьев, Ю. Ю. Соловьева, Т. Н. Насиаловская // Каучук и резина. – 1994. – № 4. – С. 36–46. – ISSN 0022-9466.

4 **Лозовая, С. Ю.** 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 (99). – С. 214–222. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_214.

References

1 On approval of requirements for handling groups of homogeneous waste of I–V hazard classes : the Order Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation dated June 11, 2021 No. 399 (as amended on April 4, 2023) // Official internet portal of legal information. – URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202111300043> (date of access: 15.03.2026).

2 **Lozovaya, S. Yu.** Investigation of particle kinematics and strength characteristics of a set of multi-knife tools for the disposal of rubber products / S. Yu. Lozovaya, Ya. P. Topchy, V. M. Kravchenko // Practice Oriented Science : UAE – Russia – India : proceedings of the International university scientific forum. – UAE, 2024. – P. 140–144. – DOI 10.34660/INF.2024.39.26.047.

3 **Soloviev, E. M.** Use of crushed rubber crumb in rubber industry products / E. M. Soloviev, Yu. Yu. Solovieva, T. N. Nasialovskaya // Kauchuk i Rezina. – 1994. – No. 4. – P. 36–46. – ISSN 0022-9466.

4 **Lozovaya, S. Yu.** Study of the performance of a vertical rotor of a grinder in obtaining rubber crumb / V. M. Kravchenko, S. Yu. Lozovaya, Yu. A. Bondarenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2025. – No. 3 (99). – P. 214–222. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_214.

- 5 **Бойцов, А. Г.** Основы механической обработки деталей. Точение и фрезерование : учебное пособие / А. Г. Бойцов, В. И. Высоцкая, Д. Н. Курицын. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 152 с. – ISBN 978-5-9729-1405-0.
- 6 **Клищенко, В. П.** Разрушение резин при различных способах механического воздействия / В. П. Клищенко, Ю. Р. Абдрахимов, Н. В. Вадудина // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2013. – № 12. – С. 419–429. – eISSN 1813-503X.
- 7 **Протасов, Ю. И.** Теоретические основы механического разрушения горных пород / Ю. И. Протасов. – Москва : Недра, 1985. – 242 с.
- 8 **Патент на полезную модель RU 237123.** Вертикальный измельчитель для переработки резинотехнических изделий / В. М. Кравченко, С. Ю. Лозовая, В. А. Чмулев. – № 2025114653 ; заявл. 29.05.2025 ; опубл. 11.09.2025.
- 9 **ГОСТ 2679–2014.** Фрезы прорезные и отрезные. Технические условия : межгосударственный стандарт. – Введ. 01.01.2016. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 15 с.
- 10 **Рахимов, И. Р.** Теоретическое обоснование способа разделения материала в ударно-центробежных измельчителях / И. Р. Рахимов, А. А. Смышляев, С. В. Морозова // АПК России. – 2022. – Т. 29, № 5. – С. 629–635. – DOI 10.55934/2587-8824-2022-29-5-629-635.
- 11 **Беззубцева, М. М.** Изучение процесса измельчения продуктов методом академика А. Н. Колмогорова / М. М. Беззубцева, В. С. Волков // LXXIII Международные научные чтения (памяти А. Н. Колмогорова) : сборник статей Международной научно-практической конференции. – Москва, 2020. – С. 27–30. – ISBN 978-5-6044222-5-0.
- 5 **Boytsov, A. G.** Fundamentals of mechanical processing of parts. Turning and milling : a textbook / A. G. Boytsov, V. I. Vysotskaya, D. N. Kuritsyn. – Moscow ; Vologda : Infra-Inzheneriya, 2023. – 152 p. – ISBN 978-5-9729-1405-0.
- 6 **Klishchenko, V. P.** Destruction of rubber under various methods of mechanical action / V. P. Klishchenko, Yu. R. Abdrakhimov, N. V. Vadulina // Electronic scientific journal “Oil and Gas Business”. – 2013. – No. 12. – P. 419–429. – eISSN 1813-503X.
- 7 **Protasov, Yu. I.** Theoretical foundations of mechanical destruction of rocks / Yu. I. Protasov. – Moscow : Nedra, 1985. – 242 p.
- 8 **Patent for utility model RU 237123.** Vertical grinder for processing rubber products / V. M. Kravchenko, S. Yu. Lozovaya, V. A. Chmulev. – No. 2025114653 ; declared 29.05.2025 ; published 11.09.2025.
- 9 **GOST 2679–2014.** Slotting and cutting milling cutters. Technical specifications : the interstate standard. – Introduced 01.01.2016. – Moscow : Standartinform, 2020. – 15 p.
- 10 **Rakhimov, I. R.** Theoretical substantiation of the method for separating material in impact-centrifugal crushers / I. R. Rakhimov, A. A. Smyshlyayev, S. V. Morozova // AIC of Russia. – 2022. – Vol. 29, No. 5. – P. 629–635. – DOI 10.55934/2587-8824-2022-29-5-629-635.
- 11 **Bezzubtseva, M. M.** Study of the process of grinding products by the method of Academician Kolmogorov A. N. / M. M. Bezzubtseva, V. S. Volkov // LXXIII International scientific readings (in memory of A. N. Kolmogorov) : collection of articles from the International scientific and practical conference. – Moscow, 2020. – P. 27–30. – ISBN 978-5-6044222-5-0.

S. Yu. Lozovaya, V. P. Voronov, V. M. Kravchenko

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE PROCESS OF RECYCLING RUBBER PRODUCTS BY A WORKING ELEMENT WITH A VARIABLE ARRANGEMENT OF KNIVES

Abstract. The process of recycling rubber products using a working element with a variable arrangement of knives is examined. It has been established that a device with a vertical working element is most effective for increasing the number of stages of grinding. The spheres of rubber crumb use are systematized: the production of building materials, road construction components, application as reclaimed material, etc. Due to the lack of general knowledge of the issues of grinding elastomers, such as rubber, and the lack of well-established theoretical approaches to this process, it is advisable to consider the destruction of rubber into crumb in the mathematical description from the perspective of its reuse in another product. That is, the crumb production mechanism itself should be considered, rather than the cutting process typical of mechanical processing, the purpose of which is to give the product a shape. Based on geometric and energy analysis, a mathematical description of the pre-fracture zone ahead of the tooth front was made. An expression for the volumetric expansion coefficient of the compaction zone was obtained, and the minimum rotor speed was determined to ensure effective

particle separation. The influence of technological parameters (rotation speed ω , number of cutting knives z , thickness of the adjusting knife z_b) on the grinding power and particle morphology has been established.

Keywords: rubber products, working element, elastomers, recycling, compaction zone, volumetric expansion coefficient, deformation work, power, mathematical description, variable arrangement of knives.

For citation: Lozovaya, S. Yu. Mathematical description of the process of recycling rubber products by a working element with a variable arrangement of knives / S. Yu. Lozovaya, V. P. Voronov, V. M. Kravchenko // Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya. – 2026. – No. 1. – P. 195–202. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_195.

Сведения об авторах

Лозовая Светлана Юрьевна

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

Воронов Виталий Павлович

Белгородский государственный технологический университет имени В. Г. Шухова (БГТУ), кафедра механического оборудования, кандидат физико-математических, доцент, e-mail: v.p.voronov2018@gmail.com

Кравченко Владимир Михайлович

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

Information about the authors

Lozovaya Svetlana Yurievna

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

Voronov Vitaly Pavlovich

Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov (BSTU), Chair “Mechanical Equipment”, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, e-mail: v.p.voronov2018@gmail.com

Kravchenko Vladimir Mikhailovich

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