

# Научно-техническая разработка ресурсоэнергосберегающей технологии с роторно-центробежным агрегатом комбинированного действия

## Scientific and technical development of a resource and energy saving technology with a combined-action rotary-centrifugal unit

*В.С. СЕВОСТЬЯНОВ<sup>1</sup>, Н.Т. ШЕИН<sup>2</sup>, В.В. ОБОЛОНСКИЙ<sup>3</sup>, П.Ю. ГОРЯГИН<sup>1</sup>, А.П. ГАЕВОЙ<sup>4</sup>*

*V.S. SEVOSTYANOV<sup>1</sup>, N.T., SHEIN<sup>2</sup>, V.V. OBOLONSKY<sup>3</sup>, P.YU. GORYAGIN<sup>1</sup>, A.P. GAEVOY<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород,

<sup>2</sup> ООО «Транспортная компания «Экотранс», Белгород, Россия

<sup>3</sup> ООО «Экоцентр «Черноземье», Белгород, Россия

<sup>4</sup> Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»», Старый Оскол, Белгородская область, Россия

<sup>1</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia

<sup>2</sup> Ecotrans Transport Company LLC, Belgorod, Russia

<sup>3</sup> Chernozemye Ecocentre LLC, Belgorod, Russia

<sup>4</sup> A.A. Ugarov Stary Oskol Technological Institute (branch) of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education National University of Science and Technology MISIS, Stary Oskol, Belgorod Region, Russia

inventor.konf@yandex.ru

Обоснована актуальность комплексной переработки техногенных полимерных материалов. Представлены разработанные патентозащищённые конструкции агрегатов и технических средств для переработки полимерных отходов. Научно-техническая разработка реализует процессы поэтапного измельчения техногенных полимерных материалов с различными физико-механическими характеристиками. Представлены результаты теоретических исследований процессов поэтапного измельчения техногенных полимерных материалов в разработанном и патентозащищённом роторно-центробежном агрегате комбинированного действия. Получены аналитические зависимости, описывающие изменение кинетических параметров при измельчении полимерных отходов дисковыми фрезами. В условиях реального производства ООО «ТК «Экотранс» и ООО «Экоцентр «Черноземье» произведён гранулят из полимерных отходов, измельчённых в роторно-центробежном агрегате комбинированного действия.

**Ключевые слова:** ресурсосберегающая технология, комплексная переработка, техногенные полимерные материалы, поэтапное измельчение, комбинированное воздействие

The relevance of complex processing of technogenic polymer materials is substantiated. The developed patent-protected designs of units and technical means for processing polymer waste are presented. The scientific and technical development implements the processes of stage-by-stage grinding of technogenic polymer materials with various physical and mechanical characteristics. The results of theoretical studies of the processes of stage-by-stage grinding of technogenic polymer materials in the developed and patented combined-action rotary-centrifugal unit are presented. Analytical dependencies were obtained that describe the change in kinetic parameters during grinding of polymer waste using disk cutters. In the real production conditions of Ecotrans Transport Company LLC and Chernozemye Ecocentre LLC, granulate was produced from polymer waste crushed in a combined-action rotary-centrifugal unit.

**Keywords:** resource-saving technology, complex processing, technogenic polymer materials, staged grinding, combined effect

DOI: 10.35164/0554-2901-2025-06-52-56

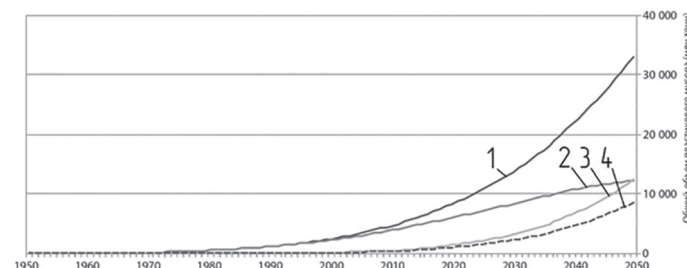
### Введение

Проблема комплексной переработки техногенных материалов, в том числе твердых коммунальных отходов (ТКО), является одной из важнейших государственных задач в мире, не только с позиции защиты нашей планеты от загрязнений, но и с точки зрения необходимости создания ресурсоэнергосберегающих технологий с использованием вторичного минерального и органического сырья, а также обеспечения стран альтернативными источниками энергии.

Актуальность решения данной проблемы в нашей стране подтверждается реализацией Федеральных проектов «Экологическое благополучие» и «Экономика замкнутого цикла» на период до 2030 года, утверждённых Указом президента РФ В.В. Путина от 7 мая 2024 г. № 309.

В настоящее время важнейшей экологической и экономической задачей является разработка технологических способов и технических средств ресурсосбережения и комплексной переработки

техногенных полимерных материалов (ТПМ), каковыми являются отходы полимеров, в связи с возрастающими объёмами их образования (рис. 1) [1–3].



**Рис. 1.** Прогнозируемый рост количества техногенных полимерных материалов, их переработки и утилизации до 2050 года [4]: 1 – образование отходов; 2 – захоронение на полигонах; 3 – сжигание; 4 – получение вторичных материалов.



При  $\alpha_{\text{деф.изм.}} = 0$ :

$$H_{\text{деф.упл.}} = H_{0\text{деф}} - (r_{\text{дуг}\phi} - R_{\phi}) \quad (6)$$

Текущее значение плотности материала:

$$\rho_{\text{деф.упл.}} = \rho_1 \frac{H_{0\text{деф}}}{h_{\text{деф.упл.}}}, \quad (7)$$

где  $\rho_1$  – плотность материала после деформации шипованными валками, кг/м<sup>3</sup>.

Величину угла зоны деформации и измельчения материала находим по следующему выражению:

$$\alpha_{\text{деф.изм.}} = \frac{\ln(r'_{\text{дуг}\alpha_{\text{деф.изм.}}} / r_{\text{дуг}\alpha_{\text{деф.изм.}}})}{k} \quad (8)$$

Длина зоны деформации и измельчения материала:

$$l_{\text{деф.изм.}} = \frac{\pi R_{\phi} \alpha_{\text{деф.изм.}}}{180} \quad (9)$$

Длительность процессов деформации и измельчения материала:

$$\tau_{\text{деф.изм.}} = \frac{l_{\text{деф.изм.}}}{\vartheta_{\phi}} = \frac{\pi R_{\phi} \alpha_{\text{деф.изм.}}}{180 \vartheta_{\phi}}, \quad (10)$$

где  $\vartheta_{\phi}$  – окружная скорость вращения дисковых фрез, м/с.

Текущее значение скорости деформационного уплотнения материала  $\vartheta_{\text{деф.изм.}}$  при уменьшении толщины измельчаемого слоя материала от  $H_{0\text{деф}}$  до  $\delta$  определяем по формуле (11):

$$\vartheta_{\text{деф.изм.}} = \frac{H_{0\text{деф}} - h_{\text{деф.упл.}}}{\tau_{\text{деф.изм.}}} \quad (11)$$

В зоне максимальных напряжений, ограниченной углом  $\alpha_{\text{изм.мах}}$ , происходит наиболее интенсивное измельчение материала, обусловленное суммарным воздействием нормальных и касательных напряжений, а также напряжений, возникающих от режущего силового воздействия дисковых фрез.

Длина зоны максимальных напряжений измельчения:

$$l_{\text{изм.мах}} = \frac{\pi \cdot R_{\phi} \cdot \alpha_{\text{изм.мах}}}{180} \quad (12)$$

Длительность процессов деформации и измельчения материала:

$$\tau_{\text{изм.мах}} = \frac{l_{\text{изм.мах}}}{\vartheta_{\phi}} = \frac{\pi \cdot R_{\phi} \cdot \alpha_{\text{изм.мах}}}{180 \vartheta_{\phi}} \quad (13)$$

В зоне упругого расширения, ограниченной углом  $\alpha_{\text{упр.}}$ , происходит резкое снижение силового воздействия на материал. Величина упругого расширения полимерных материалов определяется не только вышеуказанным фактором, но и упругопластическими характеристиками самого материала.

Расчёт геометрических и кинетических параметров в зоне упругого расширения производится аналогично зоне деформации и измельчения материала.

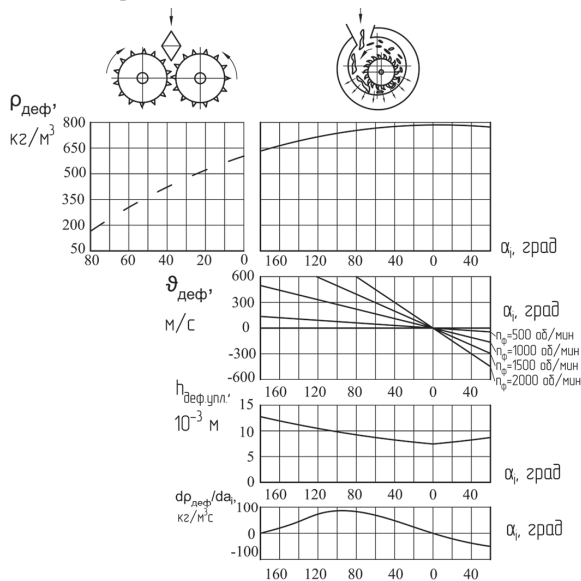


Рис. 5. Динамика изменения кинетических параметров  $\rho$ ,  $\vartheta$ ,  $h_{\text{деф.упл.}}$ ,  $dp_{\text{деф.}}/d\alpha$  от угла поворота рабочих органов РЦА КД.

Для практического использования по вышеуказанным зависимостям получены численные значения кинетических параметров при измельчении ТПМ рабочими органами РЦА КД (рис. 5):

$$D_{\phi} = 0,3 \text{ м}; n_{\phi} = 500\text{--}2000 \text{ мин}^{-1}; \rho_1 = 600\text{--}800 \text{ кг/м}^3;$$

$$H_{0\text{деф}} = 0,2\text{--}0,25 \text{ м}; \delta = 3 \text{ мм};$$

$$\alpha_{\text{деф.изм.}} = 110^{\circ}; \alpha_{\text{изм.мах}} = 25^{\circ}; \alpha_{\text{упр.}} = 20^{\circ}.$$

На деформируемый и предварительно уплотнённый измельчаемый материал действуют следующие силы: сжимающее усилие  $P_{\sigma}$  со стороны фрезерного ротора, сила трения  $F_{\text{тр}} = P_{\sigma} f$ , обеспечивающая нагнетание материала в зону максимальных напряжений, режущее усилие  $P_{\tau}$  со сдвиговым деформированием слоя материала [8].

Для определения усилия, необходимого для измельчения ТПМ дисковыми фрезами, рассмотрим равновесие сил, приложенных к материалу в зоне максимальных напряжений, ограниченной углом  $\alpha_{\text{изм.мах}}$ .

Для рассмотрения в дифференциальном виде равновесия сил выделим в зоне максимальных напряжений элементарный слой, ограниченный сечениями АВ и CD, расположенными на расстоянии  $dx$  друг от друга (рис. 6).

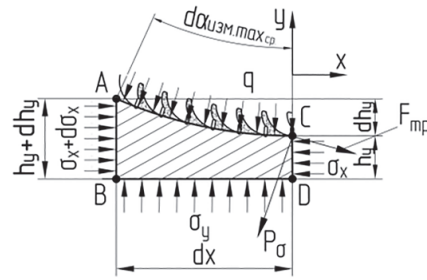


Рис. 6. Схема сил напряженного состояния элементарного слоя материала для определения напряжений.

Рассмотрим равновесие выделенного слоя ABCD при следующих условиях:

- напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  равномерно распределены на границе слоя, расположенного вдоль образующих дисковых фрез и бандажа;
- каждый элементарный слой измельчаемого материала по мере продвижения подвергается деформирующему и режущему сдвиговому напряжениям;
- максимальное результирующее напряжение возникает в зоне с наименьшим зазором  $\delta$  между дисковыми фрезами и бандажом.

При рассмотрении равновесия слоя ТПМ его движение считаем установившимся. Вследствие характерных для ТПМ физико-механических характеристик (пластичность, упругость, низкая насыщенная плотность и др.) силу инерции и силу тяжести материала не учитываем. В виду незначительной величины угла  $\alpha_{\text{изм.мах.ср.}}$  элементарный слой деформируемого материала рассматриваем при его постоянной толщине  $h_{\text{сл}}$ .

Рассмотрим равновесие сил относительно оси  $x$ :

$$\sum X = \frac{\sigma_x \cdot h_y \cdot B}{\cos \alpha_3} - \frac{(\sigma_x + d\sigma_x) \cdot (h_y + dh_y) \cdot B}{\cos \alpha_3} + \frac{q \cdot \sin \alpha_{\text{изм.мах.ср.}} \cdot l_{\sigma} \cdot B}{\cos \alpha_3} - \frac{f \cdot q \cdot \cos \alpha_{\text{изм.мах.ср.}} \cdot l_{\sigma} \cdot B}{\cos \alpha_3} = 0, \quad (14)$$

где  $\sigma_x$  – среднее нормальное напряжение деформации материала, МПа;

$h_y$  – толщина деформируемого слоя материала, м;

$B$  – ширина фрезерного рабочего органа, м;

$f$  – коэффициент трения материала о дисковые фрезы;

$q$  – удельное давление материала на контактируемые элементы, МПа;

$l_{\sigma}$  – длина дуги контакта элементарного слоя и дисковых фрез, м,

$$l_{\sigma} = R_{\phi} \cdot d \cdot \alpha_{\text{изм.мах.ср.}}$$

При условии, что  $h_y = \delta + R_{\phi} (1 - \cos \alpha_{\text{изм.мах.ср.}})$ ,

$$dh_y = R_{\phi} \cdot \sin \alpha_{\text{изм.мах.ср.}} \cdot d\alpha_{\text{изм.мах.ср.}}, \text{ получим:}$$

$$R_{\phi} \cdot d\alpha_{\text{изм.мах.ср.}} = \frac{dh_y}{\sin \alpha_{\text{изм.мах.ср.}}} \quad (15)$$

С учётом вышеуказанных зависимостей, а также считая, что среднее давление фрез на измельчаемый материал  $P_{\sigma}$  и удельное давление материала на контактируемые элементы численно равны  $P_{\sigma} = q$ ,  $F_{\text{тр}} = qf$ , получим уравнение (16):

$$d\sigma_x - (P_{\sigma} - \sigma_x) \frac{dh_y}{h_y} + F_{\text{тр}} \cdot ctg \alpha_{\text{изм.мах.ср.}} \frac{dh_y}{h_y} = 0 \quad (16)$$

После преобразования уравнения (16) получим следующее неоднородное дифференциальное уравнение:

$$\frac{dP_{\sigma}}{dh_y} + \frac{P_{\sigma} f \cdot ctg \alpha_{изм.мах.ср.}}{h_y} = \frac{P_i}{\Delta h} \left( \frac{h_0}{h_y} - 2 \right), \quad (17)$$

$$h_0 = \Delta h + \delta = 2R_{\phi} \left( 1 - \cos \alpha_{изм.мах.ср.} \right) + \delta \quad (18)$$

Решение уравнения (17) ищем в виде:

$$P_{\sigma}(h_y) = \left[ \int \frac{P_i}{\Delta h} \left( \frac{h_0}{h_y} - 2 \right) e^{\int \frac{f \cdot ctg \alpha_{изм.мах.ср.}}{h_y} dh_y} + C \right] e^{-\int \frac{f \cdot ctg \alpha_{изм.мах.ср.}}{h_y} dh_y} \quad (19)$$

Значение постоянной  $C$  для уравнения (19) находим из граничных условий при  $h_y = h_0$  и  $P_{\sigma} = 0$ .

$$C = - \frac{P_i h_0 (1 - f \cdot ctg \alpha_{изм.мах.ср.})}{\Delta h f \cdot ctg \alpha_{изм.мах.ср.} (f \cdot ctg \alpha_{изм.мах.ср.} + 1)} h_0^{f \cdot ctg \alpha_{изм.мах.ср.}} \quad (20)$$

Тогда уравнение (19) примет вид:

$$P_{\sigma}(h_y) = \frac{P_i h_0}{\Delta h \cdot f \cdot ctg \alpha_{изм.мах.ср.} (f \cdot ctg \alpha_{изм.мах.ср.} + 1)} \cdot \left[ \left( 1 + f \cdot \left( 1 - \frac{2h_y}{h_0} \right) \cdot ctg \alpha_{изм.мах.ср.} \right) - \left( 1 - f \cdot ctg \alpha_{изм.мах.ср.} \right) \cdot \left( \frac{h_0}{h_y} \right)^{f \cdot ctg \alpha_{изм.мах.ср.}} \right] \quad (21)$$

Режущее усилие  $P_{\tau}$  со стороны фрезерного рабочего органа находим по формуле [9]:

$$P_{\tau} = \mu_{ТПМ} \vartheta_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot b_{р.п.} \left( \frac{1}{\delta} - \frac{1}{h_{сл}} \right) \cdot k_{\Delta\sigma_{упр.}} \quad (22)$$

где  $\mu_{ТПМ}$  – коэффициент динамической вязкости ТПМ, Пас;

$\vartheta_{\phi}$  – окружная скорость вращения дисковых фрез, м/с;

$R_{\phi}$  – радиус дисковых фрез, м;

$b_{р.п.}$  – ширина рабочей поверхности фрезерного ротора, м;

$k_{\Delta\sigma_{упр.}}$  – коэффициент снижения напряжений при упругом расширении деформированного слоя (фрикционного воздействия фрезерного ротора на материал);

$k_{\Delta\sigma_{упр.}} = 0,6-0,8$ .

Коэффициент динамической вязкости ТПМ в расчётах принимается постоянным, т.к. процесс измельчения исследуется при установившихся технологических режимах. Для долговременной работы в технологическом комплексе рабочие узлы измельчителя оснащаются гидравлической системой охлаждения, а постоянная температура полимерных отходов обеспечивается за счёт воздушных потоков при пневнотранспортировании.

Учитывая, что

$$P_{\sigma\tau} = \sqrt{P_{\sigma}^2 + P_{\tau}^2},$$

выражения (21) и (22), обозначив

$$A = \left( 1 + f \left( 1 - \frac{2\delta}{h_{сл}} \right) ctg \alpha_{изм.мах.ср.} \right) - \left( 1 - f \cdot ctg \alpha_{изм.мах.ср.} \right) \left( \frac{h_0}{\delta} \right)^{f \cdot ctg \alpha_{изм.мах.ср.}},$$

получим уравнение для расчёта результирующей силы:

$$P_{\sigma\tau} = \sqrt{\left( \frac{P_{i0} \left[ 1 - e^{-\frac{4f}{R_{гидр.ср.}} (h_{сл} - \delta)} \right] h_{сл}}{(h_{сл} - \delta) f \cdot ctg \alpha_{изм.мах.ср.} (f \cdot ctg \alpha_{изм.мах.ср.} + 1)} \right)^2 \cdot A} + \left( \mu_{ТПМ} \vartheta_{\phi} \cdot R_{\phi} \cdot b_{р.п.} \left( \frac{1}{\delta} - \frac{1}{h_{сл}} \right) k_{\Delta\sigma_{упр.}} \right)^2 \quad (23)$$

Полученное выражение (23) используется для определения конструктивно-технологических и энергосиловых параметров РЦА КД, в т.ч. мощности, затрачиваемой на измельчение ТПМ дисковыми фрезами.

Проведённая нами научно-техническая разработка – теоретические исследования кинематических, геометрических и энергосиловых параметров патентозащищённой конструкции специального оборудования и физическое моделирование процессов измельчения ТПМ позволяют решить задачу энергоэффективного измельчения ТПМ с различными физико-механическими характеристиками. Полученные результаты необходимы для реализации разработок в производственных условиях.

Научным коллективом БГТУ им. В.Г. Шухова и инженерно-техническими работниками ООО «ТК «Экотранс» и ООО «Экоцентр «Черноземье» произведён гранулят из ТПМ: полиэтилена высокой и низкой плотности, измельчённых в РЦА КД. Получение гранулированных полимерсодержащих материалов производилось с использованием технологической линии экструдирования.

Технологическая линия включает следующее оборудование: измельчитель пластмасс – роторная дробилка SLF-1400с (Polimer Mechanical), ванна флотации (флотирующая жидкость – вода с ПАВ),

моечно-сушильный комплекс, бункер-дозатор (с объёмным дозированием), одношнековый экструдер SLE-1-150 (Mechanoplast) (рис. 7), устройство торцевой резки, блок досушки и пневмофасовки.



Рис. 7. Экструдер шнековый SLE-1-150.

Технические характеристики шнекового экструдера SLE-1-150: диаметр шнека  $D_{ш} = 150$  мм; общая длина шнека  $L_{ш} = 5,58$  м; рабочая длина шнека  $L_{ш.р.} = 5,125$  м; отношение длины к диаметру шнека  $L_{ш}/D_{ш} = 34$ ; диаметр фильер на головке  $d_{\phi} = 2,5-5$  мм, число фильер  $i_{\phi} = 34$  шт.; количество зон обогрева  $i_{з.о.} = 9$ ; мощность электронагревателей  $N_{н} = 65$  кВт; мощность электродвигателя  $N_{дв} = 110$  кВт;

Конечным продуктом является экструдированный гранулят (рис. 8) со следующими физико-механическими характеристиками: размеры гранул  $d = 2,5-5$  мм;  $l = 5-15$  мм; насыпная плотность гранул  $\rho_{гр} = 920-950$  кг/м<sup>3</sup>; механическая прочность при сжатии  $\sigma_{сж} = 10-25$  МПа; модуль упругости  $E = 100-400$  МПа; температура плавления  $T = 125-130^{\circ}\text{C}$ .

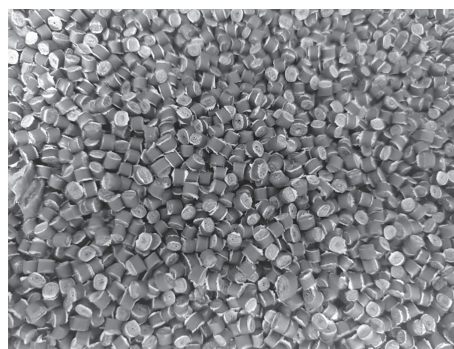


Рис. 8. Произведённый термоэкструдированный полимерный гранулят.

В настоящее время на производственных площадках ООО «ТК «Экотранс» и ООО «Экоцентр «Черноземье» проводится промышленная реализация выполненных научно-технических разработок получения из ТПМ гранулированных композиционных материалов с последующим производством изделий различного назначения: труб технического назначения, полимерного профиля, временного дорожного покрытия, плитки и др.

#### Выводы

Выполненные теоретические исследования предназначены для конструктивно-технологического проектирования рабочих органов роторно-центробежного агрегата комбинированного действия, реализующего поэтапное измельчение техногенных полимерных материалов.

Подтверждена целесообразность использования рабочих органов с развитой рабочей поверхностью для реализации комбинированного силового воздействия на измельчаемые материалы.

Получены аналитические выражения для определения основных конструктивно-технологических и энергосиловых параметров при измельчении техногенных полимерных материалов (полимерных отходов) дисковыми фрезами в камере роторно-центробежного агрегата комбинированного действия.

В условиях реального производства ООО «ТК «Экотранс» и ООО «Экоцентр «Черноземье» подтверждены результаты НИОКР по комплексной переработке ТПМ для получения композиционных материалов в экструдированном виде.

Полученный гранулят используется для производства различных видов товарной продукции широкой номенклатуры.

*Источник финансирования*

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках национального проекта «Наука и университет» по созданию новой лаборатории «Разработка, исследования и опытно-промышленная апробация наукоемких технологий и технических средств для производства полимерсодержащих композиционных смесей и изделий из техногенных органоминеральных компонентов» (проект FZWN-2024-0002) с использованием оборудования на базе Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

**Литература**

1. Аншваев А.К., Овчинников И.Г. Полимерные материалы вторичного производства в мостостроении // Транспортные сооружения, 2022. Т. 9, №2. 37 с. EDN: KKSOWR.
2. Исаева И.Ю., Одиноква И.В., Остаева Г.Ю. Реализация способа утилизации отходов термопластичных полимеров // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов, 2025. №2 (154). С. 181–187. EDN: BSFDFR.
3. Sevostyanov V.S., Goryagin P.Yu., Babukov V.A. Development and Research of Technological Equipment for Production of Polymer Composite Materials with Basalt Fiber Fillers from Man-Made Raw Materials. // Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. 173. pp. 297–304. EDN: XPVVWI.
4. Пипия Л.К., Елкин А.Г. Переработка пластмасс: оценка рынка и перспективы // Наука за рубежом: ИПРАН РАН, 2018. 33 с. EDN: SOCKEL.
5. Патент на изобретение 2724667 Российская Федерация, МПК В02С 18/00 (2006.01). Роторно-центробежный агрегат комбинированного действия для переработки органических и минеральных материалов: № 2019129930: заявл. 23.09.2019, опубл. 25.06.2020 / Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Севостьянов М.В., Горягин П.Ю., Ермилов Р.А.; заявитель БГТУ им. В. Г. Шухова. 12 с.: илл. EDN: MZUXLC.
6. Патент на изобретение № 2755436 Российская Федерация, МПК В02С 18/00 (2006.01). Роторно-центробежный агрегат с иглофрезерными рабочими органами: № 2021101630: заявл. 26.01.2021, опубл. 16.09.2021 / Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Севостьянов М.В., Горягин П.Ю., Оболонский В.В., Перельгин Д.Н., Шамгулов Р.Ю.; заявитель БГТУ им. В. Г. Шухова. 13 с.: илл. EDN: ZUVWFU.
7. Патент на полезную модель №213199 Российская Федерация, МПК В02С 18/00 (2006.01). Роторно-центробежный агрегат комбинированного действия: № 2022115621: заявл. 09.06.2022, опубл. 30.08.2022 / Севостьянов В.С., Горягин П.Ю.; заявитель БГТУ им. В.Г. Шухова. 9 с.: илл. EDN: KVKFOA.
8. Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Оболонский В.В., Севостьянов М.В., Бережной О.Л., Горягин П.Ю., Проценко А.М. Ресурсосберегающая технология комплексной переработки техногенных полимерных материалов и технические средства для её реализации // СТИН: Станки. Инструмент. №9. 2024. С. 27–30. EDN: PHWEFX.
9. Ким В.С., Шерышев М.А. Оборудование заводов по переработке пластмас: учебное пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2025. 576 с. (Высшее образование). ISBN 978-5-534-19749-5. – Текст: электронный.