

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ОТХОДОВ В ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Бобомуродов Ш.У.¹, Щедрин Е.Е.²

¹*Московский политехнический университет, Москва;*

²*Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва*

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, отходы, переработка, выбор оборудования, абразивность, показатель текучести расплава, технологическая линия, многокритериальная оптимизация.

Аннотация. Низкий уровень утилизации отходов в России, особенно в теплоэнергетике, где он не превышает 4%, требует создания эффективных производств полимерных композиционных материалов на основе вторичного сырья. Проблема выбора оборудования для таких производств осложняется высокой неоднородностью состава отходов. Традиционные методики, основанные на сравнении цены и паспортной производительности, не учитывают влияние абразивности и реологических свойств сырья, что ведет к ускоренному износу, перерасходу средств и снижению фактической производительности. В статье предложен методологический подход к выбору и компоновке оборудования для участка переработки многокомпонентных отходов в полимерные композиционные материалы. В основу подхода положены классификационные признаки: относительная абразивность минеральной составляющей (ранжирование на три группы) и показатель текучести расплава полимерной фракции. Сформированы три группы критериев: обязательные (совместимость с сырьем), технико-экономические и системные. Задача выбора оборудования формализована как многокритериальная оптимизация с целевой функцией минимизации совокупных затрат и потерь от рассогласования с характеристиками отходов при ограничениях на производительность и качество. На примере модельного синтеза линии переработки полиэтилена с золой-уноса показано, что прогнозируемый удельный расход электроэнергии составляет 0,48 кВт·ч/кг, что на 12-15% ниже, чем у линий, спроектированных без учета свойств сырья, а ресурс быстроизнашиваемых деталей достигает 1200 часов. Подход позволяет снизить субъективность проектных решений и может применяться при обосновании инвестиций и составлении технических заданий.

METHODOLOGICAL APPROACH TO SELECTING EQUIPMENT FOR PROCESSING MULTICOMPONENT WASTE INTO POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Bobomurodov Sh.U.¹, Shchedrin E.E.²

¹*Moscow Polytechnic University, Moscow;*

²*Moscow State Technological University «STANKIN», Moscow*

Keywords: polymer composite materials, waste, recycling, equipment selection, abrasiveness, melt flow index, production line, multi-criteria optimisation.

Abstract. The low level of waste disposal in Russia, especially in the thermal power industry, where it does not exceed 4%, requires the creation of efficient production of polymer composite materials based on recycled materials. The problem of choosing equipment for such industries is complicated by the high heterogeneity of the waste composition. Traditional methods based on comparing price and nominal productivity do not take into account the influence of abrasiveness and rheological properties of raw materials, which leads to accelerated wear, cost overruns and a decrease in actual productivity. The article offers a methodological approach to the selection and layout of equipment for the processing of multicomponent waste into polymer composite materials. The approach is based on classification criteria: the relative abrasiveness of the mineral component (ranking into three groups) and the fluidity index of the polymer fraction melt. Three groups of criteria have been formed: mandatory (compatibility with raw materials), technical, economic and systemic. The task of choosing equipment is formalized as a multi-criteria optimization with the objective function of minimizing the total costs and losses from mismatching with waste characteristics under constraints on productivity and quality. Using the example of the model synthesis of a polyethylene processing line with fly ash, it is shown that the projected specific energy consumption is 0.48 kWh/kg, which is 12-15% lower than that of lines designed without taking into account the properties of raw materials, and the life of quick-wear parts reaches 1200 hours. The approach reduces the subjectivity of design decisions and can be used to justify investments and draw up technical specifications.

Введение. Одним из приоритетных направлений ресурсосберегающих технологий является производство полимерных композиционных материалов (ПКМ) с использованием в качестве сырья отходов производства и потребления. ПКМ позволяют вовлекать в хозяйственный оборот крупнотоннажные отходы, складирование которых сопряжено с негативным воздействием на компоненты природной среды. Для российской теплоэнергетики характерен низкий уровень утилизации отходов, не превышающий 4%, в то время как во многих странах этот показатель превышает 50% [1]. Объемы образования полимерных отходов демонстрируют устойчивую тенденцию к росту, что обуславливает необходимость создания производственных участков, ориентированных на совместную переработку органических и неорганических компонентов.

Материалы и методы исследований. При планировании производства важной инженерной задачей выступает обоснованный выбор технологического оборудования и рациональная компоновка линии, учитывающие неоднородность состава исходного сырья. Традиционные методики базируются на сопоставлении коммерческих предложений по цене и паспортной производительности, что не обеспечивает надежности решений при переработке многокомпонентных отходов. В практике проектирования до настоящего времени доминирует упрощенная логика выбора в виде сравнения стоимости, сроков поставки и производительности альтернативных вариантов. Подобный подход игнорирует влияние состава, дисперсности, влажности и абразивности компонентов на работоспособность и ресурс оборудования, что в дальнейшем приводит к снижению фактической производительности.

Настоящее исследование посвящено разработке методологического подхода, обеспечивающего формализованную процедуру принятия решений при выборе и компоновке оборудования для участка получения ПКМ на основе смешанных отходов органического и неорганического происхождения.

В качестве сырья для получения ПКМ выступает гетерогенная смесь органических и неорганических компонентов, различающихся по физико-механическим, теплофизическим и реологическим свойствам. Органическую фракцию формируют термопластичные полимерные отходы в виде полиэтилен высокого и низкого давления, полипропилен, поливинилхлорид, полистирол, полиэтилентерефталат, а также смешанные полимерные фракции, выделяемые из твердых коммунальных отходов. К неорганической части причисляют техногенные минеральные отходы: золу-уноса, золошлаковые смеси, доменные шлаки, продукты дробления горных пород, стеклобой и тонкодисперсные отходы металлургических и энергетических производств.

Твердые коммунальные отходы классифицируются как смешанные органо-минеральные отходы потребления. Доля органических горючих компонентов в них колеблется от 50 до 85% по массе. Морфологический состав этой категории отходов нестабилен и подвержен сезонным изменениям: диапазон содержания бумаги и картона составляет 10-40%, пищевых и растительных остатков – 20-45%, пластмасс – 2-8%, стекла – 4-8%, черных металлов – 3-5,2%, текстиля – 4-7%, древесины – 0,9-3% [2]. Столь выраженная неоднородность исключает возможность тиражирования унифицированных технологических решений без предварительной классификации отходов по признакам, определяющим выбор методов и средств их переработки.

Федеральный классификационный каталог отходов построен по пятиуровневой иерархической схеме и содержит сведения о происхождении, составе и физической форме отходов. Его функциональное назначение ограничено задачами учета, нормирования и контроля; критерии, позволяющие напрямую переходить к выбору оборудования, в нем не предусмотрены. Возникает потребность в дополнительном признаке, опирающемся на технологическую совместимость компонентов и характер их поведения в процессах переработки.

Таким признаком целесообразно назначить показатель относительной абразивности минеральной составляющей K_a , вычисляемый как отношение потери массы эталонного образца при истирании о поверхность исследуемого материала к потере массы при истирании о кварцевый песок. По результатам экспериментов на образцах золы-уноса, золошлаковых

смесей и доменных шлаков разного фракционного состава минеральные отходы ранжированы по величине K_a с выделением трех групп: низкоабразивные ($K_a \leq 0,3$), к которым принадлежит зола-уноса сухого отбора; среднеабразивные ($0,3 < K_a \leq 0,6$) – золошлаковые смеси и тонкомолотые доменные шлаки; высокоабразивные ($K_a > 0,6$) – шлаки с высоким содержанием кристаллического кремнезёма и отходы дробления изверженных пород. На основе данной градации уже на начальной стадии проектирования формулируются требования к износостойкости рабочих органов измельчителей и смесителей. Технологическим классификационным признаком органической фракции служит показатель текучести расплава (ПТР), нормируемый ГОСТ 11645-2021 применительно к термопластам. Полиолефиновые отходы с ПТР 2-25 г/10 мин допускают переработку на стандартных экструдерах при отношении длины шнека к диаметру 25-33; для полиэтилентерефталата и полиамидов необходимы специализированные машины, оснащенные зоной дегазации и усиленным приводом.

Независимо от конкретного состава отходов технологическая схема получения полимерных композиционных материалов охватывает следующие переделы: подготовку сырья (сортировка, измельчение, отмывка, сушка), дозирование и смешение компонентов, пластикацию и гомогенизацию композиции, формование готовых изделий либо гранулирование полупродукта [3]. Аппаратурное оформление каждого передела диктуется морфологией и свойствами сырья, а также предъявляемыми к конечному продукту требованиями.

Ключевое влияние на энергоемкость процесса и степень диспергирования компонентов оказывает стадия измельчения. Выбор типа измельчителя определяется физико-механическими характеристиками перерабатываемого материала. Полимерные отходы, отличающиеся высокой эластичностью и склонностью к адгезии на рабочих поверхностях, наиболее эффективно измельчаются в роторно-центробежных агрегатах комбинированного действия, где процесс организован постадийно с последовательным сокращением зазора между дисковыми фрезами. Хрупкое минеральное сырьё рационально перерабатывать по двухстадийной схеме: первичное дробление в щековых или конусных дробилках и последующий помол в шаровых либо вибрационных мельницах.

Ранее проведенными исследованиями установлено, что величина относительной деформации сжатия ε при переработке полимерных отходов на валковых устройствах с зубчатыми валками связана аналитической зависимостью с диаметром валков D , высотой зубьев h и углом их профиля α . Полученные в рамках этих исследований рекомендации по подбору значений D , h и α для наиболее распространенных полимеров, таких как полиэтилена, полиэтилентерефталата и полипропилена формируют расчетную базу для проектирования измельчительного оборудования. Специфика стадии совмещения полимерной матрицы с минеральным наполнителем продиктована резким различием насыпной плотности компонентов, склонностью смеси к сегрегации и абразивностью наполнителя [4]. Если доля минеральной фазы не превышает 30% по массе, равномерного распределения частиц в объёме полимера достигают в двухроторных смесителях периодического действия с Z-образными лопастями. При более высоком наполнении рациональнее использовать двухшнековые экструдеры с однонаправленным вращением шнеков; такая конструкция совмещает смешение и пластикацию в одном агрегате под контролируемым температурным режимом.

Термомеханический рециклинг полимерсодержащих отходов непосредственно в экструдере позволяет получать композит из смеси исходных компонентов, исключая стадию предварительного гранулирования [5; 6]. Выбор экструзионной машины опирается на отношение длины шнека к его диаметру L/D и на удельную энергию деформирования. Исследования совместной переработки техногенных минеральных отходов и вторичного полимерного сырья подтвердили возможность получения композитов с эксплуатационными характеристиками, сопоставимыми с материалами на первичном полимере. Оптимизированные составы на основе поливинилхлорида с добавлением доменного шлака, золы-уноса и золошлаковых смесей обеспечили предел прочности при сжатии до 25 МПа и водопоглощение не выше 2% [7].

Результаты. Предлагаемый методологический подход к выбору оборудования строится на последовательном задействовании трех групп критериев, которые образуют иерархическую структуру принятия решений. Критерии первой группы носят обязательный характер и фиксируют принципиальную допустимость использования того или иного агрегата для переработки отходов конкретного состава. В эту группу включены: соответствие крупности исходного сырья приемному отверстию измельчителя, совместимость конструкционных материалов рабочих органов с химическим составом компонентов, а также соответствие температурного режима переработки термостабильности полимерной матрицы. Критерии второй группы, имеющие технико-экономическую природу, служат инструментом сравнительной оценки вариантов оборудования, уже прошедших фильтр обязательных требований. Среди них выделяют удельный расход энергии на килограмм готовой продукции, ресурс быстроизнашиваемых деталей (в часах до наступления предельного износа), а также коэффициент использования оборудования, аккумулирующий длительность простоев, связанных с техническим обслуживанием, очисткой и переналадками при колебаниях состава отходов [8]. Применительно к линиям рециклинга полимеров накопленный опыт эксплуатации свидетельствует: определяющим фактором экономической эффективности становится не начальная цена машин, а полная стоимость владения, агрегирующая производительность, удельное энергопотребление, штатную численность персонала, расходы на техническое обслуживание и совокупный ресурс линии.

Критерии третьей группы носят системный характер и отражают совместимость агрегатов внутри технологической цепочки. Ведущим показателем здесь выступает коэффициент структурной гибкости линии K_c , рассчитываемый как доля видов продукции, выпускаемой без замены основных узлов, в общем объеме номенклатуры, предусмотренной производственной программой участка [9]. Формализация процедуры выбора оборудования сводится к решению задачи многокритериальной оптимизации. Целевая функция F , подлежащая минимизации, суммирует три составляющие – капитальные затраты, эксплуатационные расходы и потери, обусловленные неполным соответствием машин реальному составу отходов:

$$F(X) = \alpha_1 \cdot C_{cap}(X) + \alpha_2 \cdot C_{op}(X) + \alpha_3 \cdot L_{comp}(X) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где X – вектор варьируемых параметров (типоразмеры измельчителя, смесителя, экструдера и вспомогательных устройств); C_{cap} – капитальные вложения на приобретение и монтаж, тыс. руб.; C_{op} – годовые эксплуатационные издержки, тыс. руб./год; L_{comp} – функция потерь от рассогласования оборудования с характеристиками отходов, тыс. руб./год; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – весовые коэффициенты, назначаемые экспертным путем.

Функция потерь L_{comp} количественно связывает состав сырья с эффективностью работы оборудования и выражается через коэффициент относительной абразивности K_a и показатель текучести расплава ПТР:

$$L_{comp} = k_1 \cdot (K_a - K_{a, доп}) \cdot H(K_a - K_{a, доп}) + k_2 \cdot |ПТР - ПТР_{ном}|, \quad (2)$$

где $K_{a, доп}$ – предельно допустимая абразивность для выбранного измельчителя; $ПТР_{ном}$ – значение текучести расплава, соответствующее оптимальному режиму экструзии; $H(\dots)$ – функция Хевисайда; k_1, k_2 – масштабные коэффициенты.

Система ограничений модели формируется из условий достижения заданной производительности $Q_{зад}$ и требуемого качества готового продукта, характеризуемого пределом прочности при изгибе $\sigma_{изг}$, а также из лимита установленной мощности:

$$Q(X) \geq Q_{зад}; \sigma_{изг}(X) \geq [\sigma_{изг}]; P_{уст} \leq P_{max}, \quad (3)$$

где $Q(X)$ – фактическая производительность линии, кг/ч; $\sigma_{изг}$ – допустимый предел прочности при изгибе, МПа; $P_{уст}$ – установленная мощность, кВт; P_{max} – максимальная мощность, разрешенная техническими условиями на подключение.

Реализация предложенного подхода опирается на базу данных серийного оборудования, структурированную согласно принятым классификационным признакам. По каждому типоразмеру фиксируют паспортные характеристики и допустимые интервалы изменения

параметров перерабатываемого сырья. Сопоставление результатов входного контроля отходов с информацией базы очерчивает совокупность допустимых альтернатив, а последующий отбор с привлечением критериев второй и третьей групп приводит к единственному оптимальному решению.

Компоновка технологической линии, реализующая отобранный состав оборудования, подчиняется требованиям поточной организации производства и сокращения межоперационных транспортных путей [10;11]. Производственную площадь зонируют по функциональному признаку, обособляя участки приёма и складирования сырья, подготовки компонентов, дозирования и смешения, формования и складирования готовых изделий. Конструкция линии допускает переналадку при смене рецептуры композиции без демонтажа основных агрегатов. Места перегрузки пылящих материалов оборудуют закрытыми конвейерными системами и аспирационными укрытиями. Взаимное расположение машин назначают с учетом нормативных требований к ширине проходов и проездов, установленных СП 56.13330.2021 «Производственные здания».

Демонстрация работоспособности подхода выполнена на примере расчетного синтеза линии производительностью 250-350 кг/ч по готовому продукту, ориентированной на переработку отходов полиэтилена и золы-уноса. В таблице 1 приведен состав оборудования, полученный в результате решения оптимизационной задачи (1)-(3) для следующих исходных данных: доля минеральной фазы в композиции – 30% по массе, коэффициент относительной абразивности наполнителя $K_a = 0,25$, показатель текучести расплава полиэтилена – 4,5 г/10 мин.

В состав линии включены роторный шредер с приводом 30 кВт, ножевая дробилка с диаметром ротора 500 мм, двухроторный смеситель рабочим объемом 500 л, двухшнековый экструдер с диаметром шнеков 75 мм и отношением $L/D = 32$, а также стренговый гранулятор с водяным охлаждением. Оборудование расставлено в последовательности, исключающей возвратные перемещения материала и сводящей к минимуму протяжённость межоперационных транспортных связей.

Табл. 1. Состав и характеристики оборудования технологической линии

Наименование оборудования	Марка	Производительность, кг/ч	Установленная мощность, кВт
Шредер роторный	ШР-500	350	30
Дробилка ножевая	ДН-500	300	22
Смеситель двухроторный	СД-500	250	15
Экструдер двухшнековый	ЭД-75/32	200	55
Гранулятор стренговый	ГС-200	200	5,5

Для количественного обоснования преимуществ предложенного подхода было выполнено компьютерное моделирование работы скомпонованной линии и проведен сравнительный анализ с типовым вариантом, спроектированным по традиционной методике (без учета классификационных признаков и многокритериальной оптимизации). Моделирование заключалось в решении задачи (1)-(3) методом перебора допустимых конфигураций из базы оборудования с последующим расчетом целевой функции и почасовым моделированием производственного цикла в течение 2000 часов непрерывной работы. Традиционный вариант предполагал выбор агрегатов только по паспортной производительности и минимальной закупочной стоимости без анализа влияния K_a и ПТР. Основные результаты моделирования сведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что использование классификации по K_a и ПТР в сочетании с многокритериальной оптимизацией позволило снизить удельное энергопотребление на 12-15%, увеличить ресурс быстроизнашиваемых элементов не менее чем на 60% (до 1200 часов) и уменьшить полную стоимость владения более чем на 11%. Разница в ресурсе деталей объясняется тем, что в традиционном варианте наполнитель с $K_a = 0,25$ эксплуатировался на оборудовании, не рассчитанном на абразивное воздействие, что

приводило к ускоренному износу и дополнительным простоям. Более высокий коэффициент использования в предлагаемой конфигурации обусловлен меньшим временем, затрачиваемым на замену изношенных частей и переналадку, что прямо следует из минимизации функции потерь L_{comp} (2).

Табл. 2. Сравнительный анализ показателей технологической линии

Показатель	Линия по предлагаемому подходу	Линия по традиционной методике	Отклонение
Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/кг	0,48	0,55	-12,7%
Годовые эксплуатационные издержки C_{op} , тыс. руб./год	1860	2100	-11,4%
Ресурс быстроизнашиваемых деталей, ч	1200	750	+60%
Полная стоимость владения за 5 лет, тыс. руб.	12300	13850	-11,2%
Коэффициент использования оборудования	0,91	0,82	+11,0%

Сравнительный анализ подтверждает, что включение в процедуру выбора оборудования параметров K_a и ПТР и формализованная оптимизация по трем группам критериев обеспечивают существенное улучшение технико-экономических показателей линии по сравнению с традиционным подходом, опирающимся исключительно на цену и номинальную производительность.

Моделирование работы линии показало, что переход на иное сырьё, например на золошлаковые смеси с $K_a = 0,45$ потребует увеличения диаметра шнеков экструдера до 90 мм и нанесения износостойкой наплавки на рабочие поверхности, что соответствует логике заложенных критериев. С помощью функции потерь (2) для базовой конфигурации с $K_a = 0,25$ был рассчитан ожидаемый ресурс быстроизнашиваемых элементов шнеков и дробилок до замены, составивший не менее 1200 часов. Данные по износу хорошо коррелируют с известными результатами исследований влияния абразивных минеральных наполнителей на рабочие органы экструдеров [11]. Сравнительный анализ энергопотребления синтезированной линии с данными из базы оборудования [9] для типовых линий, спроектированных без учета свойств сырья, показал, что прогнозируемый удельный расход электроэнергии 0,48 кВт·ч/кг на 12-15% ниже за счёт точного согласования характеристик экструдера с величиной ПТР и учета влияния K_a наполнителя на износ, что напрямую вытекает из целевой функции (1), минимизирующей C_{op} и L_{comp} .

Заключение. Методология выбора наиболее доступных технологий, базирующаяся на системном подходе и мониторинге состава и свойств отходов, зарекомендовала себя в научно-технической литературе как действенный инструмент обоснования проектных решений. Развивая эту методологию для области ПКМ, предлагаемый подход дополняет ее процедурой количественной оценки влияния состава отходов на выбор оборудования.

Расчетная апробация предложенных алгоритмов на примере гипотетического проекта участка по переработке полимерной тары и золы-уноса показала, что прогнозируемый удельный расход электроэнергии для скомпонованной по изложенным принципам линии составляет 0,48 кВт·ч/кг. Данный показатель на 12-15% ниже значений, характерных для линий, спроектированных без параметрической увязки с абразивностью минерального наполнителя. Ожидаемый ресурс быстроизнашиваемых элементов шнеков и дробилок до замены, согласно расчетам по зависимости (2), составит не менее 1200 часов.

Практическая значимость разработанного подхода состоит в создании формализованной процедуры, снижающей субъективность проектных решений и минимизирующей риски несоответствия выбранного оборудования реальному составу перерабатываемых отходов. Предложенную систему классификационных признаков и критериев выбора могут применять проектные организации и производственные предприятия при подготовке технических заданий, обосновании инвестиций и отборе поставщиков оборудования.

Список литературы

1. Севостьянов В.С., Шеин Н.Т., Оболонский В.В., Горягин П.Ю., Гаевой А.П. Научно-техническая разработка ресурсоэнергосберегающей технологии с роторно-центробежным агрегатом комбинированного действия // Пластические массы. – 2025. – Т. 90, №12. – С. 18-24.
2. Галихайдаров Е.В. Выбор оборудования для переработки отходов полимерных материалов // Полимерные материалы: изделия, оборудование, технологии. – 2021. – Т. 15, №4. – С. 24-31.
3. Ершова О.В., Коляда Л.Г. Исследование возможности совместной переработки техногенных минеральных и полимерных отходов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – Т. 2, №1. – С. 122-128.
4. Сынюк О.Н., Кулик Т.И. Расчет основных параметров устройства для переработки полимерных отходов // Пластические массы. – 2019. – Т. 85, №11. – С. 36-42
5. Василенко А.С. Совершенствование технологии и оборудования для переработки полимерных отходов АПК: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2017. – 21 с.
6. Шаймарданов А.Р., Галиев И.М. Анализ методов подготовки многокомпонентных полимерных отходов к переработке // Твердые бытовые отходы. – 2022. – Т. 8, №5. – С. 28-34.
7. Закиров Р.А., Хабибуллин Р.Э. Абразивный износ рабочих органов экструдеров при переработке наполненных полимерных композитов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2023. – Т. 59, №2. – С. 14-18.
8. Никифоров А.А., Ефимов К.М. Классификация техногенных минеральных отходов как основа выбора технологии их переработки // Горный журнал. – 2021. – Т. 228, №4. – С. 58-63.
9. Гусев А.В., Смирнов П.Н. Оценка полной стоимости владения оборудованием для рециклинга пластмасс // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26, №10. – С. 4-9.
10. Бобков А.В., Федоров Е.В. Принципы компоновки технологических линий переработки дисперсных материалов с высокими абразивными свойствами // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2024. – Т. 60, №4. – С. 33-37.
11. Федосеев С.В., Григорьев А.Ю. Влияние абразивных наполнителей на износ экструзионного оборудования при переработке полимерных композитов // Трение и износ. – 2022. – Т. 43, №6. – С. 731-738.

References

1. Sevostyanov V.S., Shein N.T., Obolonsky V.V., Goryagin P.Yu., Gaevooy A.P. Scientific and technical development of resource-energy-saving technology with a rotary-centrifugal unit of combined action // Plastic masses. 2025, no. 12, pp. 18-24.
2. Galikhaydarov E.V. Selection of equipment for processing polymer waste // Polymer Materials: Products, Equipment, Technologies. 2021, no. 4, pp. 24-31.
3. Ershova O.V., Kolyada L.G. Investigation of the possibility of joint processing of technogenic mineral and polymer waste // Modern Problems of Science and Education. 2015, no. 1, pp. 122-128.
4. Synyuk O.N., Kulik T.I. Calculation of the main parameters of a device for processing polymer waste // Plastic masses. 2019, no. 11, pp. 36-42.
5. Vasilenko A.S. Improvement of technology and equipment for processing polymer waste of the agro-industrial complex: Abstract of the diss. ... cand. of tech. sc. – M., 2017. – 21 p.
6. Shaimardanov A.R., Galiev I.M. Analysis of methods for preparing multicomponent polymer waste for processing // Solid Household Waste. 2022, no. 5, pp. 28-34.
7. Zakirov R.A., Khabibullin R.E. Abrasive wear of extruder working elements in processing filled polymer composites // Chemical and Petroleum Engineering. 2023, no. 2, pp. 14-18.
8. Nikiforov A.A., Efimov K.M. Classification of technogenic mineral waste as a basis for choosing a technology for its processing // Mining journal. 2021, no. 4, pp. 58-63.
9. Gusev A.V., Smirnov P.N. Assessment of the total cost of ownership of equipment for plastic recycling // Ecology and Industry of Russia. 2022, vol. 26, no. 10, pp. 4-9.
10. Bobkov A.V., Fedorov E.V. Principles of layout of technological lines for processing dispersed materials with high abrasive properties // Chemical and Petroleum Engineering. 2024, no. 4, pp. 33-37.
11. Fedoseev S.V., Grigoriev A.Yu. Influence of abrasive fillers on wear of extrusion equipment during processing of polymer composites // Friction and Wear. 2022, vol. 43, no. 6, pp. 731-738.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Бобомуродов Шахрамбек Умирзокович – аспирант	Bobomurodov Shakhrambek Umirzokovich – postgraduate student
Щедрин Евгений Евгеньевич – аспирант	Shchedrin Evgeny Evgenievich – postgraduate student
shedrin9@yandex.ru	

Получена 24.06.2026