

УДК 621.926.4

DOI 10.52928/2070-1616-2026-55-3-132-138

ПРИМЕНЕНИЕ ЦЕНТРОБЕЖНО-УДАРНЫХ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ RDF-ТОПЛИВА

канд. техн. наук, доц. П.С. ГРЕБЕНЧУК

(Белорусский государственный технологический университет, Минск)

Д.В. ДУШКЕВИЧ, Д.В. КОТОВИЧ

(ОАО «НПО Центр», Минск)

Рассмотрены проблемы утилизации полимерных коммунальных отходов в Республике Беларусь. Установлено, что в измельченном виде эти отходы могут быть использованы во многих отраслях промышленности. Предложен центробежно-ударный измельчитель для этих целей. Изложена методика расчета энергии разрушения полимерных материалов. Приведены результаты экспериментальных исследований, имевших целью определение применимости мельниц подобной конструкции к переработке полимерных отходов, а также выявление оптимальных режимов их работы. Проанализировано влияние влажности исходного материала и возникновения статического электричества на процесс измельчения. Проведена оценка производительности и удельного энергопотребления измельчителя при различных условиях. Сделаны выводы о возможности применения центробежно-ударного измельчителя с гибкими элементами для утилизации полимерных отходов и даны рекомендации по направлениям совершенствования этого процесса.

Ключевые слова: коммунальные отходы, топливо, полимеры, измельчитель, ротор, деформация, энергия, установка, продукт, фракция, наслаивание, производительность, энергопотребление.

Введение. Ежегодно в Республике Беларусь формируется 4,0–4,3 млн т твердых коммунальных отходов (ТКО). Обеспечено 100%-ное покрытие населения системой обращения с отходами, при этом более 85% населения имеют доступ к раздельному сбору. В 2024 г. заготовлено 840,2 тыс. т основных вторичных материальных ресурсов, включая отходы бумаги и картона, стекла, полимеров, изношенных шин, отработанных масел, а также электрического и электронного оборудования. В настоящее время внедряется производство RDF-топлива (Refuse-Derived Fuel), потребителями которого выступают цементные заводы (например, ОАО «Красносельскстройматериалы») и иные промышленные предприятия¹.

Разработка RDF-технологий представляет собой стратегический подход к утилизации полимерных отходов и обеспечению устойчивой энергетики. RDF получают из горючих компонентов ТКО: полимеров, целлюлозных материалов (бумага, картон), текстиля, резины, кожи и древесины. Применение RDF реализуется в цементных вращающихся печах (замена до 20–30% ископаемого топлива, как на заводе HeidelbergCement в Германии², на теплоэлектростанциях, в металлургических агрегатах, котельных установках и технологических процессах для генерации тепловой энергии и электроэнергии).

Продукты неполного сгорания полимеров (копоть, сажа) функционируют как полимерные пластификаторы в бетонных смесях, повышая прочность на сжатие до 80%. Так, исследования цементного завода «Курово» (Россия) показали рост прочности М400-бетона на 25–80% при добавке 5–10% RDF-золы³.

Несмотря на динамичное развитие переработки ТКО, физико-механические свойства полимеров определяют ключевые технологические ограничения. Макромолекулярная структура полимеров обеспечивает относительное удлинение 300–800%, что приводит к снижению эффективности механического измельчения (до 50–70% потерь энергии). В Беларуси на пилотной линии RDF-производства в Минске (проект НАН Беларуси, 2024) эта проблема решена комбинированным методом: криогенная обработка жидким азотом (–196 °C) с последующим роторным дроблением, повысившим выход фракции <10 мм до 92%⁴. Аналогично, в ЕС (завод ARCIS в Нидерландах) применяют двухстадийные шредеры с предварительным замораживанием, обеспечивая энергоэффективность на уровне 0,2–0,4 кВт·ч/кг⁵.

¹ Семенкова Т. Как в Беларуси работают над улучшением системы обращения с твердыми коммунальными отходами // SB.BY. – 2025. – 11 апр. – URL: <https://www.sb.by/articles/davayte-nachistotu-belarus-tko.html> (дата обращения: 12.02.2026).

² Alternative fuels RDF // A TEC Group. – URL: <https://www.atec-ltd.com/de/engineering/alternative-fuels-rdf.html> (дата обращения: 12.02.2026).

³ Рекомендации по применению в бетонах золы, шлака и золошлаковой смеси тепловых электростанций / НИИЖБ. – М.: Стройиздат, 1986. – 80 с.

⁴ Технология переработки полимерных отходов для получения композиционных материалов строительного назначения // Виртуальная выставка НАН Беларуси. – URL: <https://www.ictt.by/rus/exh/plan/view.php?proid=b749ac012d0fc82803c813dac8155e&lng=rus> (дата обращения: 12.02.2026).

⁵ Шредер RDF // ХусманнРус. – URL: <https://husmann.su/drobilki/shredery/shredery-rdf-husmann/> (дата обращения: 12.02.2026).

ОАО «НПО «Центр» давно и успешно занимается разработкой и исследованием центробежных агрегатов, в т.ч. центробежно-ударных дробилок и мельниц. Эти измельчители отличаются высокой эффективностью, в особенности для разрушения горнорудных материалов средней и малой прочности, а также сравнительно низкой удельной металло- и энергоемкостью⁶. В данной работе представлены результаты теоретических исследований нового варианта центробежного измельчителя с гибкими элементами.

Основная часть. В центробежно-ударном измельчителе рассматриваемой конструкции процесс измельчения исходного сырья осуществляется посредством соударения материала с гибким элементом, который закреплен на вращающемся роторе. Благодаря высокой скорости вращения гибкого элемента при столкновении с фрагментами исходного материала происходит нарушение связей между макромолекулами, что приводит к их последующему разрушению. Подобные устройства для измельчения известны и зарекомендовали себя как высокоэффективные при обработке широкого спектра материалов [7].

На рисунке 1 представлен ротор центробежно-ударного измельчителя с закрепленными на нем гибкими элементами. В процессе столкновения гибкого элемента с полимерными материалами происходит их разрушение, однако этот процесс отличается от общепринятого метода дробления, применяемого в горном производстве. При работе с полиэтиленом предполагается, что цепь тянет пленку до критического предела удлинения, при котором происходит разрыв материала. Полиэтилен представляет собой вязкопластичный полимер, способный к значительным пластическим деформациям, достигающим 300–800% удлинения перед разрушением.

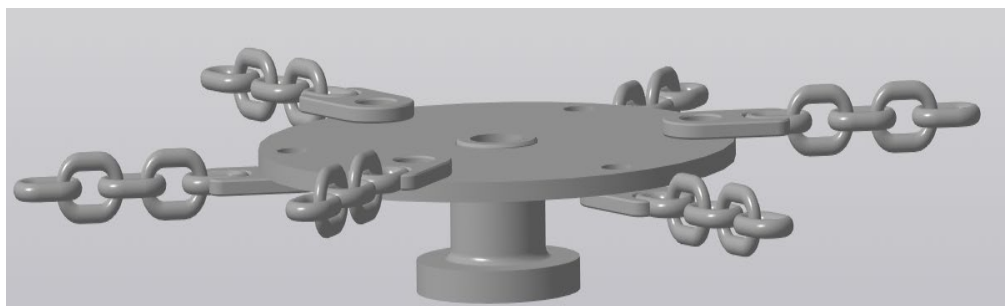


Рисунок 1. – Ротор центробежно-ударного измельчителя

Удельная деформация до разрыва материала определяется следующим образом:

$$W_{уд} = \int_0^{\epsilon_{крит}} \sigma(\epsilon) d\epsilon, \quad (1)$$

где $\sigma(\epsilon)$ – напряжение деформации материала;

$\epsilon_{крит}$ – критическое удлинение при разрыве.

К моделям, описывающим напряжение деформации материала, можно отнести двухстадийную модель, которая применяется для вязкопластичных материалов. Эта модель основана на двух этапах деформации: упругой и пластической. В таком случае формула для удельной деформации выглядит как

$$W_{уд} = W_{упр} + W_{пласт}. \quad (2)$$

где $W_{упр}$ – упругая деформация материала, Дж/м³;

$W_{пласт}$ – пластическая деформация материала, Дж/м³.

Упругая деформация происходит по следующему принципу: удлинение материала в результате удара не должно превышать относительное удлинение его текучести ($0 \leq \epsilon \leq \epsilon_y$).

$$W_{упр} = \frac{\sigma_{тек} \cdot \epsilon_y}{2} = \frac{\sigma_{тек}^2}{2 \cdot E}, \quad (3)$$

где $\sigma_{тек}$ – предел текучести, МПа;

$\epsilon_y = \sigma_{тек}/E$ – относительное удлинение при текучести;

E – модуль упругости, МПа.

⁶ Селективное измельчение материалов в центробежной мельнице многократного ударного нагружения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Гребенчук Павел Сергеевич; Белорус. гос. технол. ун-т (БГТУ). – Минск, 2011. – 23 с.

Механизм пластической деформации основан на принципе, согласно которому удлинение материала при ударе должно быть больше относительного удлинения текучести материала, но не превышать критического удлинения при разрыве ($\varepsilon_y \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\text{крит}}$). В этом случае

$$W_{\text{пласт}} = \sigma \cdot (\varepsilon_{\text{крит}} - \varepsilon_y). \quad (4)$$

Далее сделаем допущение, что предел прочности будет представлять собой среднее арифметическое между пределом текучести $\sigma_{\text{тек}}$ и пределом прочности на разрыв $\sigma_{\text{раз}}$:

$$\sigma \approx \sigma_{\text{ср}} = \frac{\sigma_{\text{тек}} + \sigma_{\text{раз}}}{2}. \quad (5)$$

Уравнение пластической деформации примет вид:

$$W_{\text{пласт}} = \frac{\sigma_{\text{тек}} + \sigma_{\text{раз}}}{2} \cdot (\varepsilon_{\text{крит}} - \varepsilon_y). \quad (6)$$

В результате формула для расчета удельной деформации материала до его разрыва:

$$W_{\text{уд}} = \frac{\sigma_{\text{тек}}^2}{2 \cdot E} + \frac{\sigma_{\text{тек}} + \sigma_{\text{раз}}}{2} \cdot (\varepsilon_{\text{крит}} - \varepsilon_y). \quad (7)$$

Энергия, необходимая для растяжения и последующего разрушения одного слоя пленки, определяется удельной деформацией материала и его объемом. Однако для вязкопластичных материалов, способных изменять свою форму под воздействием напряжений, ключевым параметром становится площадь контакта материала с гибким элементом центробежно-ударного измельчителя.

Формула для расчета энергии:

$$E_{\text{рас}} = W_{\text{уд}} \cdot a_{\text{пл}} \cdot b_{\text{пл}} \cdot h_{\text{пл}}, \quad (8)$$

где $a_{\text{пл}}$ – длина контакта материала с гибким элементом;
 $b_{\text{пл}}$ – ширина контакта материала с гибким элементом;
 $h_{\text{пл}}$ – толщина материала.

Полное уравнение для вычисления энергии, требуемой для разрушения единичного слоя материала при растяжении, может быть представлено как

$$E_{\text{рас}} = \frac{\sigma_{\text{тек}}^2}{2 \cdot E} + \frac{\sigma_{\text{тек}} + \sigma_{\text{раз}}}{2} \cdot (\varepsilon_{\text{крит}} - \varepsilon_y) \cdot a_{\text{пл}} \cdot b_{\text{пл}} \cdot h_{\text{пл}}. \quad (9)$$

Таким образом, методика расчета удельной деформации и энергии растяжения разрушения полимерной пленки, учитывающая вязкопластичные свойства полиэтилена, может быть применена для рациональной организации процесса измельчения подобных продуктов.

Цель экспериментального исследования – определение способности центробежно-ударной дробилки с гибкими элементами (цепями) к измельчению полимерных материалов, входящих в состав твердых коммунальных отходов и RDF-топлива.

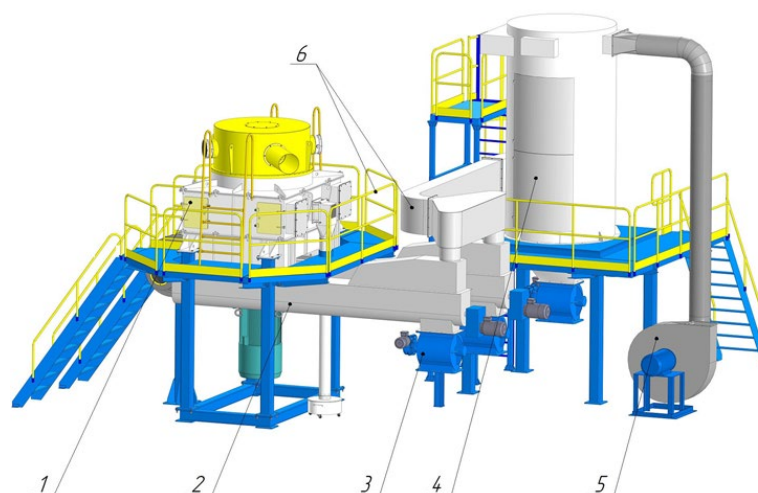
Основные задачи исследования:

- определение способности гибких цепных элементов к разрушению пластиковой тары и полиэтиленовой пленки;
- выявление оптимальных режимов работы оборудования при измельчении полимеров;
- определение влияния влажности и статического электричества на процесс измельчения;
- оценка производительности оборудования при различных условиях.

Финальные экспериментальные исследования проводились на промышленной установке центробежно-ударной дробилки с гибкими элементами, которая представлена на рисунке 2.

В экспериментах использовались следующие полимерные материалы:

- пластиковая тара: прозрачные пластиковые бутылки объемом 0,5–2 л из полиэтилентерефталата (ПЭТ);
- полиэтилен высокого давления (ПВДП): тонкая полимерная пленка (мешки, упаковка), толщина 0,1–0,2 мм, физико-механические свойства согласно ГОСТ 16337-77;
- полиэтилен низкого давления (ПНДП): полимерная пленка и листовой материал, толщина: 0,2–0,5 мм, физико-механические свойства согласно ГОСТ 16338-85.



1 – дробилка центробежная; 2 – конвейер винтовой; 3 – питатель шлюзовой; 4 – циклон-фильтр;
5 – вентилятор транспортный; 6 – воздуховоды

Рисунок 2. – Схема промышленной установки центробежно-ударной дробилки с гибкими элементами

Экспериментальное исследование было разделено на несколько этапов.

Этап 1: испытания на лабораторной установке. На этом этапе проводилась качественная оценка способности цепных элементов к разрушению полимеров. Материал загружался вручную в камеру дробления лабораторной установки с частотой вращения ротора 800 об/мин. Наблюдалось состояние материала в камере и фиксировалась возможность его полного разрушения на мелкие фрагменты.

Результаты лабораторных испытаний показали, что:

- цепные элементы успешно разрушают хрупкие материалы (ПЭТ-бутылки);
- цепные элементы способны разрушать полимерные пленки;
- существует проблема наслаивания пленки на цепные элементы, особенно во влажном состоянии.

Этап 2: испытания на промышленной установке центробежно-ударной дробилки с целью:

- выявления конструктивных недостатков оборудования;
- определения оптимальных режимов работы;
- оценки влияния геометрии рабочей камеры и влажности материала на эффективность измельчения.

Наблюдалось:

- неравномерное распределение материала в камере дробления;
- образование зон застоя материала в углах корпуса,

выявлена необходимость:

- оптимизации углов наклона питающих элементов;
- усовершенствования системы вентиляции.

Этап 3: оценка производительности и энергопотребления. На этом этапе проводились детальные испытания по определению производительности оборудования при различных режимах работы. Материал подавался в камеру дробления с максимальной производительностью, при этом фиксировались: фактическая производительность установки (т/ч); мощность, потребляемая главным двигателем; момент срабатывания защитной системы; качество готового продукта (размерное распределение фракций).

Приведем результаты исследований на промышленной установке. Эксперимент проводился на полимерном материале размером листов от 150 до 300 мм с толщиной от 30 до 200 мкм при скорости вращения ротора 800 об/мин.

В первом опыте оба регулируемых окна открыты на 80% по площади забора. При загрузке исходного материала измельченные фрагменты воздушными потоком транспортировались в бункер циклона, а неизмельченные – вращались широким кольцом с накоплением между регулируемыми окнами и перфорацией в камере измельчения (см. рисунок 2). Рабочий ток главного двигателя доходил до 230 А (номинальный – 442 А).

Во втором опыте оба регулируемых окна открыты на 10% по площади забора. Существенных изменений в движении материала внутри мельницы не возникло.

На основании проведенных испытаний сделан вывод, что необходима доработка конструкции дробилки, исключающая накопление материала в виде кольца выше зоны измельчения и направляющая весь материал в зону измельчения.

Эксперимент по оценке производительности проводился на полимерном материале тех же размеров.

Результатом испытаний промышленного образца на полиэтилене высокого давления стало получение готового продукта размером от 2 до 30 мм с ярко выраженным рваным следом. На рисунке 3 представлен материал до и после измельчения.



а – материал до измельчения; *б* – материал после измельчения

Рисунок 3. – Результаты исследований по измельчению полиэтилена высокого давления

После измельчения полиэтилена низкого давления был получен готовый продукт со средним размером 20 мм. На рисунке 4 представлен отбор проб материала до и после измельчения.



а – материал до измельчения; *б* – материал после измельчения

Рисунок 4. – Результаты исследований по измельчению полиэтилена низкого давления

Максимальная достигнутая производительность при измельчении полиэтилена составила 1900 кг/ч. При попытке увеличения производительности выше этого значения происходило срабатывание защитного автомата главного электродвигателя, что говорит о перегрузке установки. Данный результат может быть объяснен следующими факторами:

- насаиванием материала. При производительности, превышающей 1,9 т/ч, на элементы цепи поступает количество материала, которое приводит к его интенсивному насаиванию. Как было выяснено ранее, средневзвешенное количество таких слоев может достигать 3–8 в зависимости от скорости звена цепи;
- влиянием влажности. Материал брался максимально приближенным к реальным условиям, таким образом, он имел высокую влажность был не однородным и загрязненным;
- влиянием статического электричества. Полимерные материалы являются хорошими диэлектриками, поэтому при трении слоев друг о друга происходит накопление электрического заряда. Это приводит к электростатическому притяжению между слоями материала, что способствует их слипанию. Данный эффект слабо проявился на исходном материале, однако на измельченном продукте его влияние оказалось значительно сильнее. Это существенно ухудшило выгрузку из циклона: из-за статического электричества материал налипал на стенки циклона и забивал выходной патрубок шлюзового питателя.

Удельное энергопотребление при измельчении полиэтилена достигало 39–42,1 кВт·ч/т. Это значение было получено при расчете отношения средней мощности, потребляемой главным двигателем, к производительности установки. Теоретические расчеты, проведенные ранее, дали следующий результат:

- теоретическое энергопотребление для полиэтилена высокого давления: 15,81 кВт·ч/т;
- теоретическое энергопотребление для полиэтилена низкого давления: 38,16 кВт·ч/т.

Одной из ключевых проблем, выявленных в ходе экспериментов, явилось интенсивное наслаивание полимерной пленки на элементы цепи. Это явление имеет сложную физическую природу, которая объясняется следующими механизмами:

- механизмом статического электричества. При движении полимерной пленки в цепи и трении об элементы цепи происходит генерация статического электрического заряда. Поскольку полимеры являются диэлектриками, электроны, переданные от одного слоя к другому, не могут свободно перемещаться. В результате образуется электрическое поле между слоями, которое создает притягивающую силу, удерживающую слои вместе. Экспериментально наблюдалось, что при высокой скорости вращения (800 об/мин) интенсивность наслаивания была выше, чем при пониженных скоростях;

- механизмом поверхностного натяжения влаги. Капля воды имеет высокое поверхностное натяжение ($\sigma \approx 72$ мН/м при 20 °С), что позволяет ей действовать как адгезивный мостик между слоями. Даже при относительной влажности воздуха 50–60%, на поверхности полимерной пленки могут образовываться микроскопические капли конденсированной влаги. При наличии таких капель между двумя слоями полимера формируется менискообразная граница, которая создает капиллярное давление. Для тонких слоев полимера (0,1–0,2 мм) даже незначительное количество влаги (несколько микрограмм) может вызвать достаточное капиллярное давление, чтобы удерживать слои вместе;

- комбинированным воздействием. В реальных условиях оба механизма действуют одновременно, создавая синергетический эффект. Это объясняет, почему наслаивание особенно интенсивно в условиях:

- высокой влажности воздуха;
- низкой температуры (конденсация влаги);
- загрязненности материала;
- длительного хранения материала перед дроблением.

Интерпретация результатов экспериментальных исследований:

1. Пластиковые бутылки (ПЭТ) показывают наилучшие результаты благодаря хрупкому характеру материала при комнатной температуре. Хрупкие материалы разрушаются с меньшими энергетическими затратами, отсутствует проблема наслаивания;

2. В условиях реального производства сложно выделить из смешанного исходного материала полиэтилен высокого и полиэтилен низкого давления. Поэтому полученные экспериментальные результаты рекомендуется приравнять к полиэтилену низкого давления, т.к. полученные для него значения энергопотребления, во-первых, выше, во-вторых, ближе к расчетным, что указывает на адекватность разработанной математической модели. Различие между теоретическим и практическим значениями (на 2–10%) объясняется следующими факторами:

- потерями в механизме передачи. Не вся электроэнергия тратится непосредственно на разрушение материала. Часть энергии теряется на трение в подшипниках, вращение пустого ротора, преодоление аэродинамического сопротивления;

- вариативностью материала. Исходный материал (ТКО для RDF-производства) имеет разнородный состав. Наличие примесей склеивающих коагулянтов более твердых материалов требует дополнительных энергетических затрат;

- неполная загрузка во время переходных процессов. Во время экспериментов система регулирования производительности питателя не была идеально отстроена, поэтому периодически происходили колебания массового расхода материала.

Заключение. На основании проведенных исследований можно сделать следующие ключевые выводы:

1. Подтверждение концепции. Центробежно-ударная дробилка с гибкими цепными элементами способна эффективно измельчать полимерные материалы, входящие в состав RDF-топлива и твердых коммунальных отходов.

2. Практическая производительность. При оптимизации условий (осушение материала, контроль влажности) установка способна достичь производительности 1,9–2,2 т/ч.

3. Энергоэффективность. Удельное энергопотребление 39–42,1 кВт·ч/т для полиэтилена согласуется с теоретическими расчетами и находится в приемлемом диапазоне для процессов измельчения вязкопластичных материалов.

4. Проблемы и решения. Основной проблемой является наслаивание материала на элементы цепи, вызываемое влажностью и статическим электричеством. Эта проблема может быть решена:

- предварительной сушкой исходного материала;
- применением антистатических покрытий.

5. Универсальность оборудования. Оборудование успешно справляется с разнородным материалом (смесь пластика, бумаги, картона, полиэтилена), что подтверждает его пригодность для применения в производстве RDF-топлива из твердых коммунальных отходов.

6. Перспективы развития. Результаты экспериментов показывают, что при проведении надлежащей подготовки материала (сортировка по типам полимеров, осушение) производительность может быть увеличена без превышения допустимых энергетических затрат.

Проведенные экспериментальные исследования на лабораторном и промышленном образцах центробежно-ударной дробилки с гибкими элементами подтвердили эффективность данного метода для измельчения полимерных материалов в составе твердых коммунальных отходов. Максимальная достигнутая производительность составила 1900 кг/ч при удельном энергопотреблении 39–42,1 кВт·ч/т, что соответствует теоретическим прогнозам. Выявленная проблема насаивания материала связана с влажностью и статическим электричеством и может быть решена через модификацию конструкции и оптимизацию технологических параметров. Исследование подтвердило пригодность центробежно-ударных дробилок для применения в производстве RDF-топлива из твердых коммунальных отходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Душкевич Д.В., Гребенчук П.С. Исследование и анализ технологических параметров центробежно-ударного оборудования по измельчению полимерных материалов для получения RDF-топлива // НЕФТЕГАЗОХИМИЯ – 2024: материалы VII Междунар. науч.-техн. форума по химическим технологиям и нефтегазопереработке / Минск (13–15 нояб. 2024 г.) – Минск: БГТУ, 2024. – С. 200–203.

Поступила 16.03.2026

APPLICATION OF CENTRIFUGAL IMPACT GRINDERS FOR PROCESSING POLYMER MATERIALS IN RDF FUEL PRODUCTION

P. GREBENCHUK
(Belarusian State Technological University, Minsk)
D. DUSHKEVICH, D. KOTOVICH
(JSC «NPO Center», Minsk)

The article examines the problems of municipal polymer waste disposal in the Republic of Belarus. It is established that, in crushed form, this waste can be used in many industries. A centrifugal impact grinder that can be used for these purposes is proposed. A method for calculating the destruction energy of polymeric materials is presented. The results of experimental studies aimed at determining the applicability of mills of a similar design for polymer waste recycling, as well as identifying their optimal operating modes, are presented. The influence of source material moisture and the occurrence of static electricity on the grinding process are considered. The productivity and specific energy consumption of the grinder under various conditions are assessed. Conclusions are drawn regarding the feasibility of using a centrifugal impact grinder with flexible elements for polymer waste recycling, and recommendations are given for ways to improve this process.

Keywords: municipal waste, fuel, polymers, grinder, rotor, deformation, energy, installation, product, fraction, layering, productivity, energy consumption.