

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-100-109

Михайличенко С.А., Шаталов А.В., Михайличенко И.К., *Шаталов В.А.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: vladislav-shatalov@mail.ru

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ СРЕДНЕЙ И МАЛОЙ ПРОЧНОСТИ В РОТОРНО-ЦЕНТРОБЕЖНОМ ДИСПЕРГАТОРЕ

Аннотация. Роторно-центробежные измельчители (диспергаторы) широко применяются в различных областях производства, а многообразие конструкций рабочего органа и измельчающих насадок позволяет справляться с задачами по измельчению таких материалов, как известняк, мел, мергель, глина, древесина, полимеры, бумага и т.д. При работе данного типа машин прослеживается незначительный процент недомола материала. Существует несколько решений данной проблемы: дополнительный цикл измельчения или добавление насадок различных конструкций на вал агрегата. Дополнительный цикл измельчения отрицательно сказывается на производительности и совокупных энергозатратах агрегата. Для увеличения степени измельчения и повышения качества получаемой измельчаемой гомогенизированной смеси коллективом авторов было принято решение о модернизации рабочего органа диспергатора. Модернизация агрегата заключается в добавлении насадки на рабочий вал ротора с иглофрезерным воздействием на измельчаемый материал. В данной статье рассмотрена методика экспериментальных исследований для установления закономерностей процесса измельчения материалов в роторно-центробежном диспергаторе, с иглофрезерным воздействием на измельчаемый материал. Проведен расчет производительности роторного агрегата и установлено соответствие зависимости между реальной производительностью и расчетной. Было подобрано различное анизотропное сырье для измельчения в роторно-центробежном диспергаторе. Установлены зависимости выходных параметров установки, таких как производительность, потребляемая мощность и удельные энергозатраты, от входных регулируемых параметров, таких как частота вращения ротора, средний размер исходного материала и степени влажности исходного материала.

Ключевые слова: анизотропные материалы, измельчение, комплексное динамическое воздействие на материал

Введение. Измельчение различных материалов давно известный технологический процесс. Данный процесс разделяется на два основных вида: дробление и помол. В свою очередь помол бывает грубый, тонкий, сверхтонкий и коллоидный. Каждый вид помола достигается определенной конструкцией измельчителя. К примеру, тонкое измельчение, возможно, получить при истирающем воздействии на сырье, а более грубый помол получается при раздавливающем, разрезающем и ударном воздействии на материал. Для получения более качественного сырья существуют такие агрегаты, в принципе работы которых лежит комплексное физико-механическое воздействие на измельчаемый материал. Щековые дробилки комбинируют раздавливающее и сдвиговое воздействие, благодаря сложному движению шатунного механизма щеки, различные роторные диспергаторы имеют несколько видов насадок на едином валу, которые обеспечивают разнообразные комбинации механического воздействия на сырье.

Следует отметить, что процессы помола анизотропных материалов являются чрезвычайно

энергоемкими; в этой связи, вопросом принципиальной важности, является снижение энергопотребления, создание помольных машин и определение оптимальных режимов их работы, которые обеспечивали бы необходимое качество помола при минимальных энергозатратах. Это требует научного, теоретического и лабораторного обеспечения на базе углубленного изучения процессов и специфики помола в существующих измельчающих машинах (мельницах, диспергаторах, дезинтеграторах и др.).

Прослеживая путь развития помольного оборудования, можно отметить, что, несмотря на радикальное изменение конструкций, основным их принципом остается воздействие на волокна в зазоре между перекрещивающимися ножевыми элементами. Ножевые размалывающие машины являются наиболее универсальным оборудованием, применяющимся практически на всех стадиях, где требуется измельчение и помол анизотропных материалов. Перспективным направлением развития помольного оборудования для измельчения анизотропных материалов, является

внедрение насадок с иглофрезерным воздействием на измельчаемый материал.

На сегодняшний день известно несколько конструкций роторных помольных агрегатов. С несколькими камерами (рис. 1) и однокамерные агрегаты комплексного динамического воздействия на материал.

Многокамерные диспергаторы работают следующим образом. В первой камере происходит грубый помол с ударным воздействием. Во

второй камере следует разрезающее воздействие и истирание материала. Безусловно, у такой установки есть ряд явных преимуществ, но и также есть недостатки, наличие нескольких камер увеличивает металлоемкость конструкции, требует динамической балансировки, увеличения числа приводов, обеспечение продольного движения сырья между камерами.

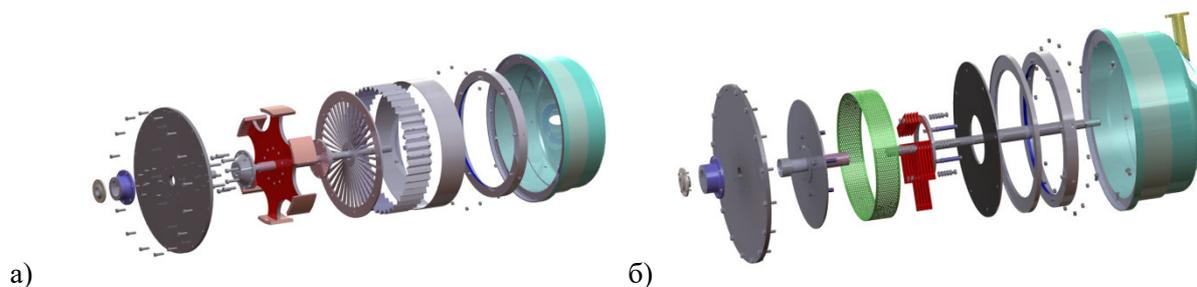


Рис. 1. Роторный агрегат с двумя камерами.
а – первая камера грубого помола; б – вторая камера тонкого помола

Коллектив авторов совместно с лабораторией «Инженер Будущего» на базе кафедры Технологических комплексов, машин и механизмов БГТУ им. В.Г. Шухова провел исследование диспергаторов с однокамерным и многокамерным устройством и установил, что агрегаты с однокамерной конструкцией способны обеспечить комплексное динамическое воздействие на сырье благодаря сложному строению рабочего органа. У исследуемого агрегата рабочим органом является ротор с различными насадками, обеспечивающими режущее и истирающее воздействие на сырье. Для повышения дисперсности измельченного продукта нами была проведена модернизация агрегата и установлена насадка с иглофрезерным воздействием.

Материалы и методы. В ходе проведенных исследований работы роторно-центробежного агрегата (РЦА), выяснилось, что на производительность машины основное влияние оказывает интенсивность разрушения материала в зоне зубчатой оболочки ротора. Предварительные и последующие стадии разрушения частиц материала являются вспомогательными и не оказывают характерного влияния на величину производительности.

Представим зависимость в общем виде [1]:

$$Q_{изм} = V_{mat} \cdot \rho \cdot n \quad (1)$$

где V_{mat} – объем перерабатываемого материала, заключенный в режущих канавках съемного рабочего элемента, (m^3); ρ – насыпная плотность измельчаемого материала, (kg/m^3); n – частота вращения ротора, (min^{-1})

$$Q_{изм} = 0,9 \cdot 0,12 \cdot 0,9 \cdot 13 \cdot 170 \cdot 2000 \cdot 0,75 \cdot 0,03 \cdot 0,996 = 32 \text{ кг/ч.}$$

Выражение (1) является общим и не учитывает ряд конструктивно – технологических параметров. Введем следующие величины: α – угол наклона режущих канавок к оси ротора; k_{ϕ} – коэффициент заполнения материалом; k_{λ} – коэффициент, учитывающий выходной зазор агрегата.

Получим:

$$Q_{изм} = V_{mat} \cdot \rho \cdot n \cdot k_{\phi} \cdot k_{\lambda} \cdot \cos \alpha \quad (2)$$

Объем перерабатываемого материала рассчитываем, как:

$$V_{mat} = l \cdot b \cdot h \cdot z \quad (3)$$

где l – длина канавки ротора, м; b – ширина канавки, м; h – высота канавки, м; z – количество канавок, шт;

Подставив формулу 3 в выражение 2, получим окончательную формулу производительности РЦА:

$$Q_{изм} = l \cdot b \cdot h \cdot z \cdot \rho \cdot n \cdot k_{\phi} \cdot k_{\lambda} \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

Следует учесть, что величина $k_{\phi} = 0,65 - 0,75$. При отсутствии конической насадки, ограничивающей площадь выходного сечения агрегата и являющейся основным сдерживающим фактором, эффективность работы РЦА существенно снизится. Поэтому величина коэффициента, учитывающего выходной зазор помольной части агрегата составляет $k_{\lambda} = 0,01 - 0,03$ [2].

В соответствии с полученной методикой рассчитаем производительность созданной опытно – экспериментальной установки [2, 3]:

Из полученных результатов следует, что разница $Q_{изм}$ и $Q_{опыт}$ составляет $\sim 8\%$. Данное значение приемлемо и лежит в диапазоне допустимых погрешностей. Реальная производительность агрегата зависит от выбранного сырья и его физико-механических свойств.

Далее следует рассчитать потребляемую мощность роторно-центробежным агрегатом. При работе РЦА мощность затрачивается на:

1. разрезание материала в каждой из ячеек зубчатого ротора – $N_{рез.з}$;

2. разрезание слоя материала в зазоре между иглофрезерной насадкой и зубчатым статором – $N_{рез.и}$;

3. перемещение материала выгрузочной крыльчаткой – $N_{вент}$.

Отсюда получаем общую формулу потребляемой мощности [2, 3]:

$$N_{общ} = \frac{N_{рез.з} + N_{рез.и} + N_{вент}}{\eta}; \text{ Вт}, \quad (5)$$

где η – КПД привода РЦА.

Мощность, затрачиваемая на разрезание материала находим по формуле:

$$N_{рез.з} = (P_{\Sigma\text{сопр}} \cdot r_p) \omega, \quad (6)$$

где $P_{\Sigma\text{сопр}}$ – суммарное сопротивление, возникающее при срезе слоя материала в ячейках, Н; r_p – радиус ротора, $r_p = 0,09$ м.

Суммарное сопротивление находим по формуле:

$$P_{\Sigma\text{сопр}} = P_{\Sigma\text{сопр.яч}} \cdot z, \quad (7)$$

где $P_{\Sigma\text{сопр.яч}}$ – сопротивление, возникающее при срезе слоя материала в одной ячейке, Н.

Сопротивление в одной ячейке находим:

$$P_{\Sigma\text{сопр.яч}} = P_{\sigma} n_s, \quad (8)$$

где P_{σ} – сила сопротивления разрезанию частицы материала, Н; $P_{\sigma} = 3,9$ Н; n_s – среднестатистическое количество опилок в ячейке.

Мощность, затрачиваемая на разрезание слоя материала в зазоре между иглофрезерной насадкой и зубчатым статором:

$$N_{рез.и} = N_{рез} \mu, \quad (9)$$

где μ – коэффициент разрезания иглофрезами, $\mu = 0,6$.

Мощность, затрачиваемая на вентилятор, находим по формуле:

$$N_{вент} = N_a + N_g, \quad (10)$$

$$N_a = Q_m \cdot L \cdot k_c, \quad (11)$$

$$N_g = b \cdot k_c \cdot i \cdot \pi \cdot n \cdot \sin \alpha \frac{R-r}{2}, \quad (12)$$

где Q_m – производительность РЦА, кг/с; L – длина крыльчатки, м; k_c – общий коэффициент аэродинамического сопротивления; $k_c = 1,8$; b – ширина лопастей, м; k – удельное сопротивление массы резанию, Н/м²; i – количество лопастей; n – частота вращения ротора, с⁻¹; α – угол поворота лопастей; $\alpha = 30^\circ$; R – радиус окружности

описываемой лопастью, м; $R = 0,130$ м; r – расстояние от центра вращения до начала лопасти, $r = 0,0155$ м.

По приведенным формулам производим расчет мощности привода РЦА, принимаем размер средневзвешенной частицы материала равной $a_{ср} = 0,005$ м, в данном случае рассматриваем древесные частицы.

Находим объем средневзвешенных частиц сырья:

$$V_{ср.ч} = 4/3 \cdot \pi \cdot (a_{ср}/2)^3, \quad (13)$$

$$V_{ср.ч} = 4/3 \cdot 3,14 \cdot (0,005/2)^3 = 523 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

Находим среднестатистическое количество частиц сырья в ячейке:

$$n_s = \frac{V_{яч} k_{я}}{V_{ср.ч}}, \quad (14)$$

$$n_s = \frac{9720 \cdot 10^{-9} \cdot 0,65}{523 \cdot 10^{-9}} = 12 \text{ шт.}$$

Мощность, затрачиваемая на разрезание материала:

$$N_{рез} = 468 \cdot 0,093 \cdot 78,5 = 1073 \text{ Вт};$$

$$P_{\Sigma\text{сопр}} = 46,8 \cdot 10 = 468 \text{ Н};$$

$$P_{\Sigma\text{сопр.яч}} = 3,9 \cdot 15 = 46,8 \text{ Н.}$$

Мощность, затрачиваемая на истирание слоя материала:

$$N_{ист} = 1073 \cdot 0,6 = 644 \text{ Вт.}$$

Мощность, затрачиваемая на вентилятор:

$$N_{вент} = 1 + 2,5 = 3,5 \text{ Вт};$$

$$N_a = 1,21 \cdot 0,07 \cdot 1,8 = 1 \text{ Вт};$$

$$N_g = 0,05 \cdot 1,8 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 25 \cdot \sin 30^\circ \frac{0,13 \cdot 0,155}{2} = 2,5 \text{ Вт};$$

$$N_{общ} = \frac{1073 + 644 + 4}{0,83} = 1912 \text{ Вт.}$$

Основная часть. Большинство исследований нами проведено для установления с помощью эксперимента функциональных или статистических связей между несколькими величинами, что является основой для будущего многофакторного планирования эксперимента на основе методов математического моделирования. Классический метод постановки эксперимента подразумевает фиксирование на принятых уровнях всех переменных факторов, кроме одного, значения которого определенным образом изменяют в области его существования [4]. Количество изменяемых показателей определяет факторность эксперимента.

Для проведения эксперимента по измельчению волокнистых материалов была использована запатентованная лабораторная установка, размещенная на кафедре «Технологических комплексов машин и механизмов» [5].

При исследовании процессов измельчения в роторно-центробежном агрегате на стадии поисковых экспериментов использовались следующие материалы: бумага, известняк, древесный опил и пластик [6].

При проведении многофакторного планирования эксперимента использовалась бумага, мел, пластик. Древесный опил на стадии предварительного помола, оказался не пригоден к измельчению в роторно-центробежном агрегате (РЦА). Материалы были предварительно отсортированы на фракции 3-х средних размеров (табл. 1).

Показатель сопротивления сырья излому – один из существенных показателей, характеризующих механическую прочность измельчаемого материала. Он зависит от длины волокон, из которых образовано сырье, их прочности, гибкости и сил связи между волокнами.

Таблица 1

Характеристики материалов, используемых в экспериментах

Материал Характеристики	Насыпная плотность, кг/м ³	Средний размер, A _{ср} , · 10 ⁻³ м ²	Влажность материала, W, %
Бумага	50–100	0,1 0,5 0,9	4–6
Мел	100–150	0,1 0,5 0,9	20–35
Пластик	150–200	0,9 1 1,5	10
Кремнезем	200–250	0,9 1 1,5	20–35

При проведении экспериментальных исследований использовались стандартные методики. Испытания проводились на спроектированном роторно-центробежном агрегате с модернизированным ротором. На рабочий орган установки была жестко закреплена иглофрезерная насадка,

для обеспечения вспомогательного разрушающего воздействия на материал (рис. 2). Данное технологическое решение позволило нам интенсифицировать помол и доизмельчать частицы среднего размера.

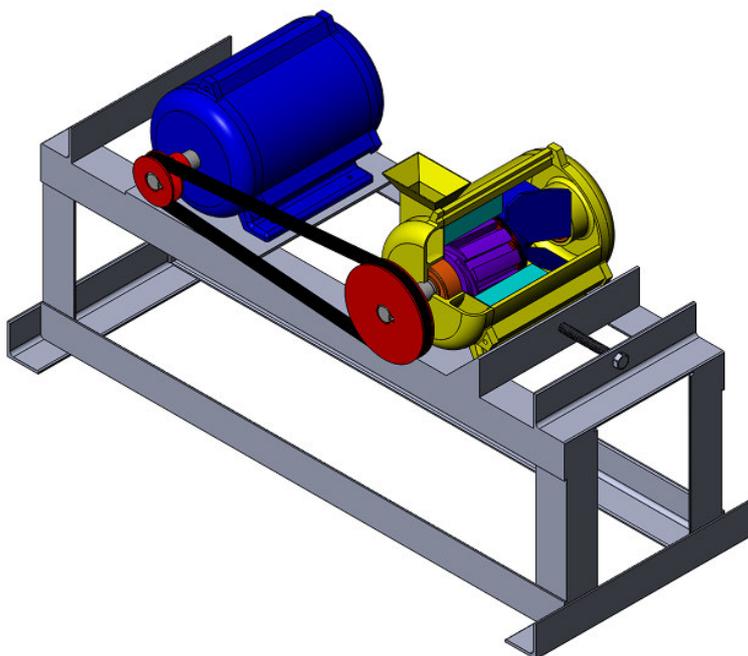


Рис. 2. Лабораторный роторно-центробежный агрегат

Подготовка материала для проведения лабораторных исследований осуществлялась ручным способом в связи с малым объемом, требуемым для проведения экспериментов. Отходы бумаги и

мела были подготовлены в 3-х различных фракциях: 0,1; 0,5; 0,9 · 10⁻³ м². Пробы измельченного в лабораторной установке материала отбирались из накопительного мешка-уловителя при помощи аспирационной системы, состоящей из циклона,

рукавного фильтра и вентиляторной установки. Отходы полимерной промышленности представлены нашим производственным партнером – транспортной компанией ООО «ТК Экотранс» из цеха по производству пластиковых труб. Вес из-

мельченного материала оценивался на электронных весах с высокой точностью 0,1 г, модель – Diamond-500.

На рисунке 3 представлены результаты помола пластика, бумаги, мела и кремнезема. Все полученные и вводные данные показаны в таблице 2.



Рис. 3. Результаты исходного и измельченного материала:
а) отходы макулатуры; б) отходы пластиковых труб; в) мел; г) кремнезем

Таблица 2

Результаты лабораторного эксперимента

Наименование сырья	Размер частиц исходного материала, Д × Ш, мм	Степень измельчения
Бумага	50×50	40–50
Пластик	10×20	20–25
Мел	5×5	50–70
Кремнезем	1×0,5	70–100

Проведенные испытания по результатам модернизации РЦА обеспечили положительные результаты. Агрегат работал устойчиво, «проскока» недоизмельченного продукта не наблюдалось. Ситовой анализ конечной фракции показал, что максимальный размер частиц материала не превышал размер выходного зазора рабочей зоны РЦА. Данная фракция составляет 90 % от общей массы измельченного материала, остальные 10 % были либо чуть больше, либо в микро дисперсном состоянии. Производительность агрегата составила $Q_{\text{лаб}}=35$ кг/ч.

Экспериментальным путем было доказано, что полученная производительность меняется в зависимости от измельчаемого сырья. Под каждый вид сырья требуется подобрать свои режимы работы агрегата: скорость вращения ротора, мощность привода и т.д. К примеру, для измельчения целлюлозных отходов затрачиваемая мощность привода была низка, что позволило добиться экономии электроэнергии, а для измельчения кремнезема и некоторых видов полимеров приходилось увеличивать мощность привода (при помощи частотного регулятора).

Также, в ходе проведения экспериментов были выявлены зависимости в ошибках измерений, которые были описаны в трудах Л.З. Румшинского «Математическая обработка результатов эксперимента» [7].

В ходе проведения экспериментальных исследований были выявлены пути дальнейшей модернизации исследуемого агрегата. Одним из перспективных направлений совершенствования РЦА является повышение стадийности помола сырья, путем создания дополнительной камеры воздействия на измельчаемый сырьё. Данное технологическое решение описывалось в статье Михайличенко С.А. «Роторно-центробежный диспергатор со смежными камерами классификации и гомогенизации». В данном труде описывается влияние добавления камеры гомогенизации на получаемое сырьё [8].

Полученные результаты проведенных экспериментов позволяют нам с уверенностью говорить о дальнейшем промышленном применении нашего агрегата. В настоящее время существует высокий спрос на переработку макулатуры, из

нее можно получить утеплители, из измельченного пластика изготавливают водопроводные трубы, пленки, бордюры и технологические люки, решетки, настилы спортивных площадок и др. Мелкодисперсный мел требуется в строительстве для приготовления растворов, штукатурок, лакокрасочном производстве и других отраслях [9].

Для достижения турбулентного эффекта в камере выгрузки РЦА возможно использование крыльчаток с турбовинтовым строением или применения направляющего (разгонного) аппарата по периметру камеры разряжения.

С целью комплексного исследования процесса измельчения доработанной установки мы также использовали в качестве сырья силикатный материал (кремнезем и стеклобой). В результате получили отрицательный эффект при эксплуатации установки РЦА, так как на стадии предварительного измельчения материал оказался достаточно мелкой фракции для данной установки, т.е. переизмельчается в мелкую (сорную) фракцию, что вызывает большие потери производительности за счет образования амортизационной подушки из измельчаемого материала.

Отходы стекольной промышленности мало пригодны для переработки в разработанной нами роторно-центробежной установке, так как стекло является высоко абразивным и достаточно твердым материалом и попросту разрушает режущие кромки зубчатой насадки рабочего ротора. Для измельчения стекольного боя более пригодны молотковые и вальцевые дробилки, где доминирует интенсивное ударное воздействие.

Таким образом, необходимо ограничить спектр перерабатываемых материалов в соответствии с общепринятой шкалой твердости Мооса до 4–5 единиц [10].

Выше 5 единицы шкалы Мооса лежит кварцевый материал. Кварц – уникальный и очень популярный камень. Добраться до него сложно, поэтому зачастую приходится применять быстрый, но, к сожалению, не совсем экологичный способ – взрыв [11].

Разборная роторная конструкция нашего агрегата позволяет добавлять на рабочий вал дополнительные насадки для повышения качества

помола измельчаемого сырья. Правильность хода проведенных исследований подтверждена рядом патентов известных ученых и изобретателей. В патенте профессора Севостьянова В.С. № 2755436 описывается агрегат, имеющий иглофрезерное рабочее колесо. Предлагаемое изобретение направлено на повышение производительности и эффективности агрегата, расширение его технологических возможностей за счёт многостадийного воздействия на материал иглофрезерными рабочими органами [12]. Известно, что иглофрезерные агрегаты хорошо подходят для измельчения полимерного сырья. Данные материалы обладают высокой прочностью, стойкостью к кислотной среде, хорошей свариваемостью слоев, не впитывают влагу [13].

При разработке энергоэффективного оборудования для переработки твердых полимерных материалов особое внимание должно уделяться их физико-механическим характеристикам, таким как упругость, пластичность, температура плавления и др. [14].

Одним из направлений конструктивно-технологического совершенствования измельчительного оборудования, направленных на снижение энергоемкости процесса измельчения, является применение рабочих органов с развитой поверхностью [15].

Выводы.

1. Проведены экспериментальные исследования по измельчению различных видов материалов средней и малой прочности: бумаги, полимеров, известняка, кремнезема на лабораторном образце роторно-центробежного агрегата.

2. Установлена фактическая производительность агрегата на разных режимах работы с различным сырьем.

3. Выполнен расчет производительности, потребляемой мощности агрегата и установлено соответствие фактической и расчетной производительности.

4. Намечены пути дальнейшей модернизации разработанного роторного агрегата

5. Но результатам выполненных работ созданы предпосылки для разработки технологического регламента и производственного внедрения агрегата.

***Источник финансирования.** Работа выполнена в рамках выполняемого проекта по теме: № СП2-4/3-2024 «Разработка инновационных решений по селективной переработке техногенных отходов для создания комфортной среды проживания» в рамках реализации Программы развития БГТУ им. В.Г. Шухова на 2021–2030 гг.*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Михайличенко С.А. Роторно-центробежный диспергатор со смежными камерами классификации и гомогенизации. // Качество, безопасность, энерго- и ресурсосбережение в промышленности строительных материалов и строительстве на пороге XXI века: Сб. докл. Междунар. науч.-практич. конф. Белгород: БелГТАСМ, 2000. Ч. 6. С. 195–198.

2. Михайличенко С.А. Шаталов А.В., Шаталов В.А. Методика определения основных параметров роторно-центробежного агрегата // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: Материалы международной научно-практической конференции, Белгород, 23–25 сентября 2021 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. С. 289–295.

3. Вердиян М.А., Кафаров В.В. Новые принципы анализа и расчета процессов и аппаратов измельчения // Цемент. 1982. № 10. С. 6–9.

4. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов // Машиностроение, 1981. 184 с.

5. Пат. 2786113 С1 Российская Федерация, МПК В02С 18/00. Роторно-центробежный диспергатор / В.А. Шаталов, С.А. Михайличенко, А.В. Шаталов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 2022. Бюл. №35. 4 с.

6. Шаталов А.В., Шаталов В.А., Шавирская Д.С. Роторно-центробежный агрегат для измельчения перерабатываемых отходов // Образование. Наука. Производство : XIII Международный молодежный форум, Белгород, 08–09 октября 2021 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. С. 968–971.

7. Ковалева Т.Е. Шкала Мооса в геотехнологиях и горной добыче // Достижения науки и образования. 2020. № 14(68). С. 20–21.

8. Румшинский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. Наука, 1971. 192 с.

9. Вердиян М.А., Кафаров В.В. Принципы анализа и расчета процессов измельчения в технологии цемента // Журнал ВХО им. Д.И. Менделеева. 1988. Т. 33. №4. С. 416–422.

10. Михайличенко И.К. Состояние и перспективы развития кварцевой отрасли в России. // XIV Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство» Сборник докладов. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022.

Ч. 20. Фундаментальные и прикладные исследования в области. 2022. С. 107–110.

11. Качаев А.Е., Орехова Т.Н., Севостьянов В.С., Чемеричко Г.И. Исследования производительности дезинтегратора с внутренним рециклом материалов // Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях : Материалы международной научно-практической конференции, Белгород, 23–25 сентября 2021 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. С. 151–159.

12. Пат. № 2755436 С1 Российская Федерация, МПК В02С 18/00. роторно-центробежный агрегат с иглофрезерными рабочими органами : № 2021101630 : заявл. 26.01.2021 : опубл. 16.09.2021 / В.С. Севостьянов, Н.Т. Шеин, М.В. Севостьянов [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Бюл. № 25.

13. Севостьянов В.С., Горягин П.Ю., Севостьянов М.В., Проценко А.М. Технология и технические средства для переработки полимерных

отходов с получением компонентов полимерцементных бетонов // Безопасность, защита и охрана окружающей природной среды: фундаментальные и прикладные исследования : Сборник докладов Всероссийской научной конференции, Белгород, 04–08 октября 2022 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2022. С. 182–186.

14. Проценко А.М., Нагаев Б.Ю., Бабуков В.А., Горягин П.Ю. Машины и агрегаты для переработки техногенных волокнистых материалов // XII Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство» : Материалы форума, Белгород, 01–20 октября 2020 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2020. С. 1113–1118.

15. Севостьянов В.С., Горягин П.Ю., Бабуков В.А. Исследование процесса измельчения техногенных полимерных материалов иглофрезерными рабочими органами // Энергетические системы. 2019. № 1. С. 313–318.

Информация об авторах

Михайличенко Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, профессор кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: prorector@intbel.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шаталов Алексей Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: alexscha@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Михайличенко Ирина Константиновна, аспирант кафедры «Технологии стекла и керамики». E-mail: m_igrinac@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46

Шаталов Владислав Алексеевич, аспирант кафедры механического оборудования. E-mail: vladislav-shatalov@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 19.04.2024 г.

© Михайличенко С.А., Шаталов А.В., Михайличенко И.К., Шаталов В.А., 2024

Mikhailichenko S.A., Shatalov A.V., Mikhailichenko I.K., *Shatalov V.A.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

**E-mail: vladislav-shatalov@mail.ru*

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE GRINDING OF MEDIUM AND LOW STRENGTH MATERIALS IN A ROTARY CENTRIFUGAL DISPERSANT

Abstract. Rotary – centrifugal grinders are widely used in various fields of production, and the diverse structure of the grinding nozzles on the rotor allows them to cope with the tasks of grinding materials such as wood, plastic, rubber, paper, etc. During the operation of grinding rotary machines, a certain percentage of non-crushed material is traced, there are several solutions to this problem: an additional grinding cycle or

the addition of a pre-grinding nozzle to the shaft of the rotary unit. An additional grinding cycle of raw materials adversely affects the performance of the dispersing unit. In order to improve the grinding performance of the unit and improve the quality of the resulting crushed homogenized mixture, our scientific and technical team decided to modernize the working body of the dispersant. Modernization of the unit consists in adding a nozzle to the working shaft of the rotor with a needle milling effect on the crushed material. In this article, the method of experimental research is considered to establish the regularities of the process of grinding materials in a rotary shredder, with needle milling action on the crushed material. The calculation of the performance of the rotary unit was carried out and the relationship between the actual performance and the calculated one was established. Various anisotropic raw materials were selected for grinding in a rotary -centrifugal dispersant. The dependences of the output parameters of the installation, such as productivity, power consumption and specific energy consumption, on the input adjustable parameters, such as the rotor speed, the average size of the source material and the degree of humidity of the source material are established.

Keywords: *anisotropic materials, grinding, complex dynamic effect on the material.*

REFERENCES

1. Mihajlichenko S.A. Rotary-centrifugal disperser with adjacent classification and homogenization chambers [Rotorno - centrobezhnyj dispergator so smezhnymi kamerami klassifikacii i gomogenizacii]. *Kachestvo, bezopasnost', energo- i resursosberezhenie v promyshlennosti stroitel'nyh materialov i stroitel'stve na poroge XXI veka: Sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-praktich. konf. Belgorod: BelGTASM, 2000. CH.6. Pp. 195–198. (rus)*
2. Mihajlichenko S.A., Shatalov A.V., Shatalov V.A. Methodology for determining the main parameters of a rotary-centrifugal unit [Metodika opredeleniya osnovnyh parametrov rotorno-centrobezhnogo agregata]. *Energo-resursosberegayushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoj i stroitel'noj otraslyah : Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Belgorod, 23–25 sentyabrya 2021 goda. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2021. Pp. 289–295. (rus)*
3. Verdiyana M.A., Kafarov V.V. New principles of analysis and calculation of grinding processes and apparatus [Novye principy analiza i rascheta processov i apparatov izmel'cheniya]. *Zhurnal Cement. 1982. No. 10. Pp. 6–9. (rus)*
4. Spiridonov A.A. Planning an experiment when researching technological processes [Planirovaniye eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh processov]. *Mashinostroenie, 1981. 184 p. (rus)*
5. Shatalov V.A., Mihajlichenko S.A., Shatalov A.V. Rotorno-centrobezhnyj dispergator. Patent RF, no. 2786113. 2022. (rus)
6. Shatalov A.V., Shatalov V.A., Shavirskaya D.S. Rotary-centrifugal unit for grinding non-recyclable waste [Rotorno - centrobezhnyj agregat dlya izmel'cheniya nepererabatyvaemyh othodov]. *Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo : XIII Mezhdunarodnyj molodezhnyj forum, Belgorod, 08–09 oktyabrya 2021 goda. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2021. Pp. 968–971. (rus)*
7. Kovaleva T.E. Mohs scale in geotechnology and mining [Shkala Moosa v geotekhnologiyah i gornoj dobyche]. *Dostizheniya nauki i obrazovaniya. 2020. No. 14(68). Pp. 20–21. (rus)*
8. Rumshinskij L.Z. Mathematical processing of experimental results [Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta]. *Nauka, 1971. 192 p. (rus)*
9. Verdiyana M.A., Kafarov V.V. Principles of analysis and calculation of grinding processes in cement technology [Principy analiza i rascheta processov izmel'cheniya v tekhnologii cementa]. *Zhurnal VHO im. D.I. Mendeleeva. 1988. Np4. Pp. 416–422. (rus)*
10. Mihajlichenko I.K. State and prospects for the development of the quartz industry in Russia [Sostoyaniye i perspektivy razvitiya kvarcevoj otrasli v Rossii]. *XIV Mezhdunarodnyj molodyozhnyj forum «Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo» Sbornik dokladov. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2022. CH. 20. Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya v oblasti. 2022. Pp. 107–110. (rus)*
11. Kachaev A.E., Orekhova T.N., Sevost'yanov V.S., Chemerichko G.I. Performance studies of a disintegrator with internal material recycling [Issledovaniya proizvoditel'nosti dezintegratora s vnutrennim reciklom materialov]. *Energo-resursosberegayushchie tekhnologii i oborudovanie v dorozhnoj i stroitel'noj otraslyah : Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, Belgorod, 23–25 sentyabrya 2021 goda. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2021. Pp. 151–159. (rus)*
12. Sevost'yanov V.S., Shein N.T., Sevost'yanov M.V. Rotorno-centrobezhnyj agregat s iglofrezernymi rabochimi organami. Patent RF, no 2755436, 2021. Byul. No 25. (rus)
13. Sevost'yanov V.S., Goryagin P.Y., Sevost'yanov M.V., Procenko A.M. Technology and technical means for processing polymer waste to obtain components of polymer-cement concrete [Tekhnologiya i tekhnicheskie sredstva dlya pere-

rabotki polimernyh othodov s polucheniem komponentov polimercementnyh betonov]. Bezopasnost', zashchita i ohrana okruzhayushchej prirodnoj sredy: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya : Sbornik dokladov Vserossijskoj nauchnoj konferencii. Belgorod: Belgorodskij gosudarstvennyj tekhnologicheskij universitet im. V.G. Shuhova, 2022. Pp. 182–186. (rus)

14. Procenko A.M., Nagaev B.Y., Babukov V.A., Goryagin P.Y. Machines and units for processing technogenic fibrous materials [Mashiny i agregaty dlya pererabotki tekhnogennyh voloknistykh

materialov]. XII Mezhdunarodnyj molodezhnyj forum «Obrazovanie. Nauka. Proizvodstvo» : Materialy foruma, Belgorod, 01–20 oktyabrya 2020 goda. Belgorod: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2020. Pp. 1113–1118.

15. Sevost'yanov V.S., Goryagin P.Y., Babukov V.A. Study of the process of grinding technogenic polymer materials using needle-milling working bodies [Issledovanie processa izmel'cheniya Tekhnogennyh polimernyh materialov iglofrezernymi rabochimi organami]. Energy systems. 2019. No. 1. Pp. 313–318. (rus)

Information about the authors

Mikhailichenko, Sergey A. Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Technological Complexes, Machines and Mechanisms. E-mail: proector@intbel.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Shatalov, Alexey V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Complexes, Machines and Mechanisms. E-mail: alexscha@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Mikhailichenko, Irina K. Postgraduate student of the Department of Glass and Ceramics Technology. E-mail: m_irinac@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Shatalov, Vladislav A. Postgraduate student of the Department of Mechanical Equipment. E-mail: vladislav-shatalov@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

Received 19.04.2024

Для цитирования:

Михайличенко С.А., Шаталов А.В., Михайличенко И.К., Шаталов В.А. Экспериментальные исследования измельчения материалов средней и малой прочности в роторно-центробежном диспергаторе // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 10. С. 100–109. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-100-109

For citation:

Mikhailichenko S.A., Shatalov A.V., Mikhailichenko I.K., Shatalov V.A. Experimental studies of the grinding of medium and low strength materials in a rotary centrifugal dispersant. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 10. Pp. 100–109. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-110-109