

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-9-97-106

*\*Ханин С.И., Зыбин Р.В., Мордовская О.С.**Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова**\*E-mail: dh@intbel.ru*

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА КЛАССИФИКАЦИИ МАТЕРИАЛА В КЛАССИФИЦИРУЮЩЕЙ ПЕРЕГОРОДКЕ ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЫ\*\*

**Аннотация.** Шаровые мельницы широко применяются для диспергирования материалов в различных отраслях промышленности, как отличающиеся простотой обслуживания, эксплуатации и достаточно высокой производительностью. Для совершенствования процесса внутримельничной классификации грубомолотого материала предлагается новая конструкция классифицирующей перегородки с лопастями, имеющими цилиндрические просеивающие поверхности. Целью исследования являлось обоснование целесообразности применения разработанной конструкции классифицирующей перегородки на промышленной шаровой мельнице. Решены задачи проведения виртуального эксперимента по реализации процесса классификации грубомолотого материала на лопастях с цилиндрической и плоской просеивающими поверхностями; построения и анализа уравнения регрессии, адекватно описывающего эффективность процесса классификации грубомолотого материала цилиндрической просеивающей поверхностью в зависимости от варьируемых факторов, определения рациональных областей их значений; сравнения эффективности использования лопастей с цилиндрической и плоской просеивающими поверхностями для внутримельничной классификации грубомолотого материала; подтверждения возможности обеспечения разработанной классифицирующей перегородкой массовой производительности, необходимой для работы мельницы. В ходе работы применялись методы имитационного и математического моделирования. В результате исследования обоснована целесообразность применения на шаровой мельнице  $D \times L = 2 \times 10,5$  м классифицирующей перегородки с лопастями, имеющими цилиндрические просеивающие поверхности.

**Ключевые слова:** программная среда, цифровая модель, размер частиц, фракции частиц, подрешетный продукт, графические зависимости.

**Введение.** Производства многих материалов и изделий связаны с процессами измельчения, в значительной степени определяющими их качественные характеристики. В промышленности строительных материалов, огнеупорной, химической и других отраслях для диспергирования различных материалов широко применяются шаровые мельницы (ШМ). Их распространению способствовали универсальность применения, простота обслуживания, достаточно высокая производительность. К существенному недостатку этих мельниц относят повышенный удельный расход электроэнергии, связанный с особенностями организации в них процесса измельчения [1-7]. Для совершенствования процесса измельчения в ШМ применяется большое разнообразие устройств. Энергообменные устройства и бронефутеровки различных конструкций обеспечивают рациональный режим движения мелющих тел, классифицирующие устройства осуществляют выделение из шароматериальной среды частиц материала определенной крупности и направляют их в соответствующую камеру [4, 8-12]. К большой группе классифицирующих устройств относятся межкамерные перегородки различных конструкций. Одинарные межкамерные перегородки осуществляют разделение корпуса мельницы на камеры с различными разме-

рами мелющих тел и перемещение частиц материала определенных размеров из предыдущей камеры, в последующую. Двойные элеваторные перегородки, в дополнение к функциональному назначению одинарных, регулируют скорость продольного движения материала в мельнице. Двойные классифицирующие перегородки, выполняя функции одинарных, разделяют поступающий в них материал на более крупные и более мелкие фракции, которые соответственно направляют в предыдущую и последующую камеры. Существуют различные конструкции классифицирующих перегородок. В зарубежной литературе [7], при анализе промышленного применения ШМ, рассматривается использование классифицирующей перегородки с центральным перфорированным разгрузочным устройством. Характеристики процесса классификации материала в перегородке не приводятся, что объясняется практической невозможностью их определения из-за расположения перегородки во вращающемся корпусе между помольными камерами с движущимися мелющими телами. При анализе на возможную классифицирующую способность к недостатку конструкции следует отнести малые размеры просеивающей поверхности перфорированного разгрузочного устройства, что приводит к низкой эффективности процесса классификации материала и возврату большого количества

мелкофракционного материала в камеру грубого помола, снижению производительности перегородки. Эффективность процесса классификации материала пропорциональна ширине классифицирующей поверхности, при этом ее длина должна быть в 2...3 раза больше ширины.

По сравнению с рассмотренной классифицирующей перегородкой в конструкциях классифицирующих перегородках с плоскими радиально или наклонно расположенными перфорированными лопастями просеивающие поверхности имеют значительно увеличенные размеры. Анализируя классифицирующие способности этих конструкций перегородок следует отметить, что из-за кинематических особенностей перемещения материала по перфорированным лопастям промежутки времени, в течение которых осуществляется активная классификация материала на просеивающей поверхности, составляет доли секунды; соотношение длины и ширины просеивающих поверхностей, особенно для мельниц малых типоразмеров, недостаточно для эффективной классификации материала. Наклон перфорированных лопастей приводит к неравномерному распределению материала по просеивающей поверхности. Эти особенности приводят к снижению эффективности классификации и производительности перегородок, в результате чего уменьшается производительность ШМ и увеличивается удельный расход электроэнергии.

С учетом указанных недостатков перегородок с плоскими перфорированными лопастями для повышения эффективности процесса внутримельничной классификации материала разработана конструкция классифицирующей перегородки с перфорированными лопастями в форме полуцилиндров (далее цилиндрические лопасти) [13]. Конструкция цилиндрических лопастей, в сравнении с плоскими радиально расположенными перфорированными лопастями, обеспечивает увеличение длины контактирующих с классифицируемым материалом поверхностей и времени перемещения по ним материала, которое, в зависимости от типоразмера ШМ, может составлять несколько секунд. В сравнении с расположенными радиально плоскими лопастями длина просеивающих поверхностей увеличивается в полтора раза. Все это позволяет повысить эффективность процесса классификации материала в мельнице, увеличить ее производительность и снизить удельный расход электроэнергии. Для изготовления перегородки предлагаемой конструкции могут использоваться все конструктивные элементы перегородки с плоскими радиально расположенными перфорированными лопастями, кроме самих перфорированных лопа-

стей. Машиностроительными предприятиями изготавливаются просеивающие поверхности плоской, конусообразной, цилиндрической форм и могут поставляться по размерам заказчика. Это позволяет сделать вывод о сопоставимости технологичности конструкций предлагаемой классифицирующей перегородки и ее прототипа - перегородки с плоскими перфорированными лопастями, по технической подготовке производства, изготовлению, эксплуатации и ремонту.

Предположение об эффективности предложенной конструкции нуждается в сопоставлении эффективностей процесса классификации материала в разработанной классифицирующей перегородке и ее прототипе. Вследствие сложности реализации необходимых для этого физических экспериментов в расположенной во вращающемся корпусе мельницы классифицирующей перегородке, целесообразным является использование математического описания процессов классификации материала в перегородках. Существуют математические описания, позволяющие определить эффективность процесса классификации материала на радиально расположенных плоских просеивающих поверхностях классифицирующих перегородок. Вследствие отличий формы просеивающей поверхности, ее расположения относительно продольной оси корпуса ШМ эти математические описания не могут быть использованы для определения рациональных параметров разработанной классифицирующей перегородки, обеспечивающих эффективный процесс классификации материала. В этой связи целесообразным является использование существующих программных продуктов для симуляции процессов классификации материала в перегородках.

**Методология.** Исследование процесса классификации грубомолотого материала в классифицирующей перегородке шаровой мельницы  $D \times L = 2 \times 10,5$  м осуществлялось в программной среде EDEM, широко используемой для симуляции различных технологических процессов [14-17]. Мельницы этого типоразмера эксплуатируются на отечественных предприятиях по производству цемента, силикатного кирпича, газосиликатных, керамических, огнеупорных изделий. Частота вращения корпуса мельницы составляет  $n = 0,35$  об/с. С учетом размеров, поставляемых на предприятия для этих ШМ литых вариантов бронефутеровок и секторов перегородок расчетная ширина просеивающей поверхности цилиндрической лопасти составляет 0,5 м, длина дуги полуцилиндра – 1,05 м. Для лопасти с плоской просеивающей поверхностью эти параметры соответственно составляют 0,5 м и 0,67 м. С учетом

рекомендаций [18] принята ширина щелевых отверстий просеивающих поверхностей лопастей  $b = 4 \times 10^{-3}$  м. При построении цифровых моделей лопастей использовались размеры шпальтовых сварных сит с профилем типа  $Sbb/W$ , обеспечивающие необходимую жесткость лопасти и «живое сечение»  $S = 52\%$  [19]. Классифицируемому материалу назначались физические свойства сыпучей среды. Продолжительность виртуального эксперимента преимущественно определяется количествами фракций и частиц классифицируемого материала. Исходя из технических возможностей персонального компьютера при в классифицирующей перегородке размещалась одна лопасть, сыпучая классифицируемая среда представлялась двумя фракциями с размерами частиц верхнего класса -  $d_{m1} = 4,5 \times 10^{-3}$  м и нижнего класса -  $d_{m2} = 3,5 \times 10^{-3}$  м. Такие условия ограничивали количество частиц материала в эксперименте  $n \leq 8,2 \cdot 10^4$  штук, что позволило уменьшить максимальное количество времени одного эксперимента до нескольких часов. Исследование процесса классификации материала на просеивающей поверхности цилиндрической лопасти, вращающейся вокруг продольной оси классифицирующей перегородки, осуществлялось с использованием метода математического планирования эксперимента [20]. Применялся полнофакторный эксперимент по плану ЦКРП-2<sup>3</sup>. В качестве исследуемой функции принята выраженная в процентах эффективность классификации [21]

$$E = \frac{\alpha - \vartheta}{\alpha(100 - \vartheta)} 10^4, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – содержание нижнего класса в исходном материале, %;  $\vartheta$  – содержание нижнего класса в надрешетном продукте, %.

Согласно [21] эффективность классификации можно определить с использованием другого выражения:

$$E = \frac{C}{M \cdot \alpha} 10^4, \quad (2)$$

где  $C$  – масса подрешетного продукта, кг;  $M$  – масса исходного материала, кг.

Тогда

$$C = \frac{E \cdot M \cdot \alpha}{10^4} = \frac{E \cdot M \cdot (100 - K)}{10^4}, \quad (3)$$

где  $K$  – содержание верхнего класса частиц в исходном материале, %.

Массовая производительность классифицирующей перегородки, кг/с:

$$Q = n \cdot i \cdot C, \quad (4)$$

где  $i$  – количество лопастей с просеивающими поверхностями в классифицирующей перегородке, штук.

В ходе проведенных поисковых экспериментов были определены варьируемые факторы: относительная скорость вращения корпуса  $\psi$ ; масса классифицируемого материала, подаваемого на просеивающую поверхность цилиндрической лопасти,  $M_m$ ; содержание верхнего класса частиц в исходном материале,  $K$ . Уровни варьирования факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Исследуемые факторы и уровни варьирования ПФЭ ЦКРП 2<sup>3</sup>

Факторы	Обозначение		Интервал	Уровни варьирования факторов				
	Кодированный вид	Натуральный вид		-1,68	-1	0	+1	+1,68
Относительная частота вращения корпуса	$X_1$	$\psi$ , доли единиц	0,07	0,642	0,69	0,76	0,83	0,878
Масса классифицируемого материала	$X_2$	$M_m$ , кг	0,298	0,5	0,702	1	1,298	1,5
Содержание верхнего класса частиц в исходном материале	$X_3$	$K$ , %	2,976	5	7,024	10	12,976	15

В результате обработки экспериментальных данных, полученных в программной среде EDEM при проведении виртуальных экспериментов на ПЭВМ по плану ЦКРП-2<sup>3</sup>, получено уравнение регрессии, адекватно описывающее эффектив-

ность классификации частиц материала просеивающей поверхностью цилиндрической лопасти классифицирующей перегородки в зависимости от указанных факторов.

В кодированной форме уравнение имеет вид:

$$E = 94,074 - 0,456 X_1 - 0,456 X_2 - 0,507 X_3 - 0,276 X_1 \cdot X_2 - 0,180 X_1 \cdot X_3 - 0,170 X_2 \cdot X_3 - 0,232 X_1^2 - 0,286 X_2^2 - 0,097 X_3^2. \quad (5)$$

В натуральной форме уравнение имеет вид:

$$E = 52,056 + 87,325\psi + 16,883M_m + 0,897K - 13,231\psi \cdot M_m - 0,864\psi \cdot K - 0,192K \cdot M_m - 47,347\psi^2 - 3,221M_m^2 - 0,011K^2. \quad (6)$$

**Основная часть.** В программной среде *Maple* проведено исследование уравнений (4) и (5), получены графические зависимости. В заданной области функция является непрерывной. Установлены экстремумы функции. Наименьшее значение  $E = 88,18\%$  функция принимает при  $K = 15\%$ ,  $M_m = 1,5$  кг,  $\psi = 0,878$ . Наибольшего значения  $E = 94,68\%$  функция достигает при  $K = 5\%$ ,  $M_m = 0,94$  кг,  $\psi = 0,745$ . Наибольшее относительное изменение значения функции составляет  $7,35\%$ .

Графические зависимости, характеризующие поведение функции при изменении в исследуемых интервалах относительной частоты вращения корпуса, массы классифицируемого материала, подаваемого на просеивающую поверхность цилиндрической лопасти, содержания верхнего класса частиц в исходном материале приведены на рис. 1.

Варьирование значениями  $\psi$  в исследуемом диапазоне приводит к нелинейному характеру изменения функции с экстремумом в центральной области исследуемого диапазона значений. Увеличение значений фактора, с начала исследуемого интервала, приводит к росту значений функции до определенной величины и последующему их уменьшению (рис. 1, *a, b*). Так, при  $M_{m1} = 0,5$  кг,  $K_1 = 5\%$ , соответствующих минимальным значениям интервалов варьирования этих факторов, увеличение значений  $\psi$  приводит к первоначальному росту эффективности классификации и последующему ее снижению. При  $\psi_1 = 0,642$   $\psi_{кр}$ ,  $\psi_2 = 0,76$   $\psi_{кр}$  и  $\psi_3 = 0,878$   $\psi_{кр}$  эффективность классификации принимает соответственно значения  $E_{11} = 92,95\%$ ,  $E_{12} = 94,13\%$  и  $E_{13} = 93,99\%$ . Относительное изменение значения функции составляет  $1,27\%$ . При  $M_{m2} = 1$  кг,

$K_2 = 10\%$  и указанных значениях  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  функция принимает значения  $E_{21} = 94,18\%$ ,  $E_{22} = 94,07\%$  и  $E_{23} = 92,64\%$  соответственно. Изменение значения функции составляет  $1,66\%$ . При  $M_{m3} = 1,5$  кг,  $K_3 = 15\%$  и указанных значениях  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$  функция принимает соответственно значения  $E_{31} = 92,30\%$ ,  $E_{32} = 92,03\%$  и  $E_{33} = 88,18\%$  - относительное изменение значения функции составляет  $4,67\%$ .

Варьирование значениями  $M_{m1}$  в исследуемом диапазоне приводит к нелинейному характеру изменения функции с экстремумом в центральной области исследуемого диапазона значений. Увеличение значений фактора, с начала исследуемого интервала, приводит к росту значений функции до определенной величины и последующему их уменьшению (рис. 1, *a, c*). Так, при  $\psi_1 = 0,642$ ,  $K_1 = 5\%$ , соответствующих минимальным значениям интервалов варьирования этих факторов, увеличение значений  $M_m$  приводит к первоначальному росту эффективности классификации и последующему ее снижению. При  $M_{m1} = 0,5$  кг,  $M_{m2} = 1$  кг и  $M_{m3} = 1,5$  кг эффективность классификации принимает соответственно значения  $E_{41} = 92,95\%$ ,  $E_{42} = 94,25\%$  и  $E_{43} = 93,94\%$ . Относительное изменение значения функции составляет  $1,40\%$ . При  $\psi_2 = 0,76$ ,  $K_2 = 10\%$  и указанных значениях  $M_{m1}, M_{m2}$  и  $M_{m3}$  функция соответственно принимает значения  $E_{51} = 94,03\%$ ,  $E_{52} = 94,07\%$  и  $E_{53} = 92,50\%$  - относительное изменение значения функции составляет  $1,70\%$ . При  $\psi_3 = 0,878$ ,  $K_3 = 15\%$  и указанных значениях  $M_{m1}, M_{m2}$  и  $M_{m3}$  функция соответственно принимает значения  $E_{61} = 92,23\%$ ,  $E_{62} = 91,01\%$  и  $E_{63} = 88,18\%$  - относительное изменение значения функции составляет  $4,59\%$ .

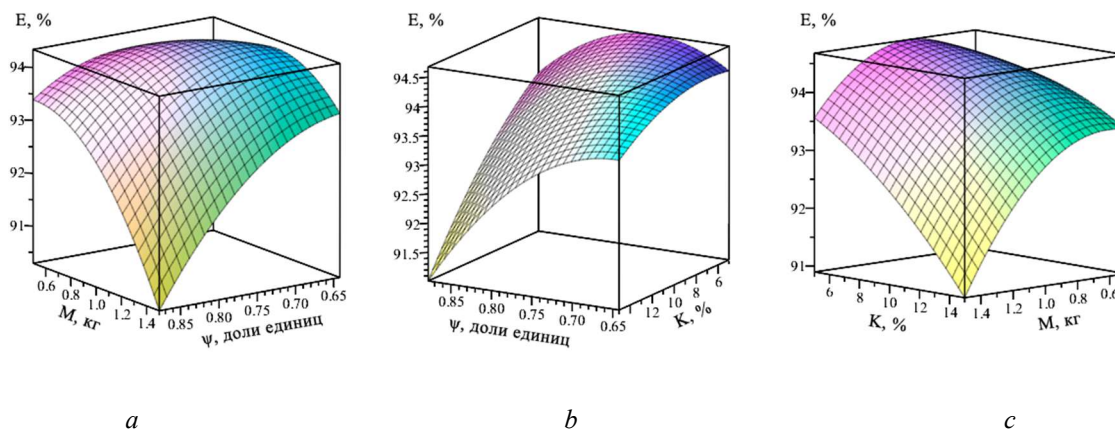


Рис. 1. Зависимости изменения эффективности классификации частиц материала  $E$  цилиндрической поверхностью лопасти от относительной частоты вращения корпуса  $\psi$ , массы классифицируемого материала  $M_m$ , содержания  $K$  верхнего класса частиц в исходном материале

Варьирование значениями  $K$  в исследуемом диапазоне приводит к нелинейному характеру изменения функции с экстремумом в центральной области исследуемого диапазона значений. Увеличение значений фактора, с начала исследуемого интервала, приводит к росту значений функции до определенной величины и последующему их уменьшению (рис. 1, *b, c*). Так, при  $M_{M1} = 0,5$  кг,  $\psi_1 = 0,642$ , соответствующих минимальным значениям интервалов варьирования этих факторов, увеличение значений  $K$  приводит первоначальному росту эффективности классификации и последующему ее снижению. При  $K_1 = 5\%$ ,  $K_2 = 10\%$ , и  $K_3 = 15\%$  эффективность классификации принимает соответственно значения  $E_{71} = 92,95\%$ ,  $E_{72} = 93,36\%$  и  $E_{73} = 93,22\%$ . Относительное изменение значения функции составляет  $0,44\%$ . При  $M_{M2} = 1$  кг,  $\psi_2 = 0,76$  и указанных значениях  $K_1, K_2$  и  $K_3$  функция соответственно принимает значения  $E_{81} = 94,65\%$ ,  $E_{82} = 94,07\%$  и  $E_{83} = 92,94\%$  - относительное изменение значения

функции составляет  $1,84\%$ . При  $M_{M3} = 1,5$  кг,  $\psi_2 = 0,878$  и указанных значениях  $K_1, K_2$  и  $K_3$  функция принимает соответственно значения  $E_{91} = 91,86\%$ ,  $E_{92} = 90,29\%$  и  $E_{93} = 88,18\%$  - относительное изменение значения функции составляет  $4,17\%$ .

К рациональным следует отнести следующие области значений варьируемых факторов:

Для относительной частоты вращения корпуса:  $\psi = 0,7 \dots 0,8 \psi_{кр}$ .

Для подаваемой на просеивающую поверхность цилиндрической лопасти массы классифицируемого материала:  $M_M = 0,8 \dots 1,2$  кг.

Для содержания верхнего класса частиц в исходном материале:  $K = 5 \dots 10\%$ .

На рис. 2 и рис. 3 приведены иллюстрации, характеризующие взаимодействие классифицируемого материала с цилиндрической и плоской просеивающими поверхностями лопастей в классифицирующей перегородке.

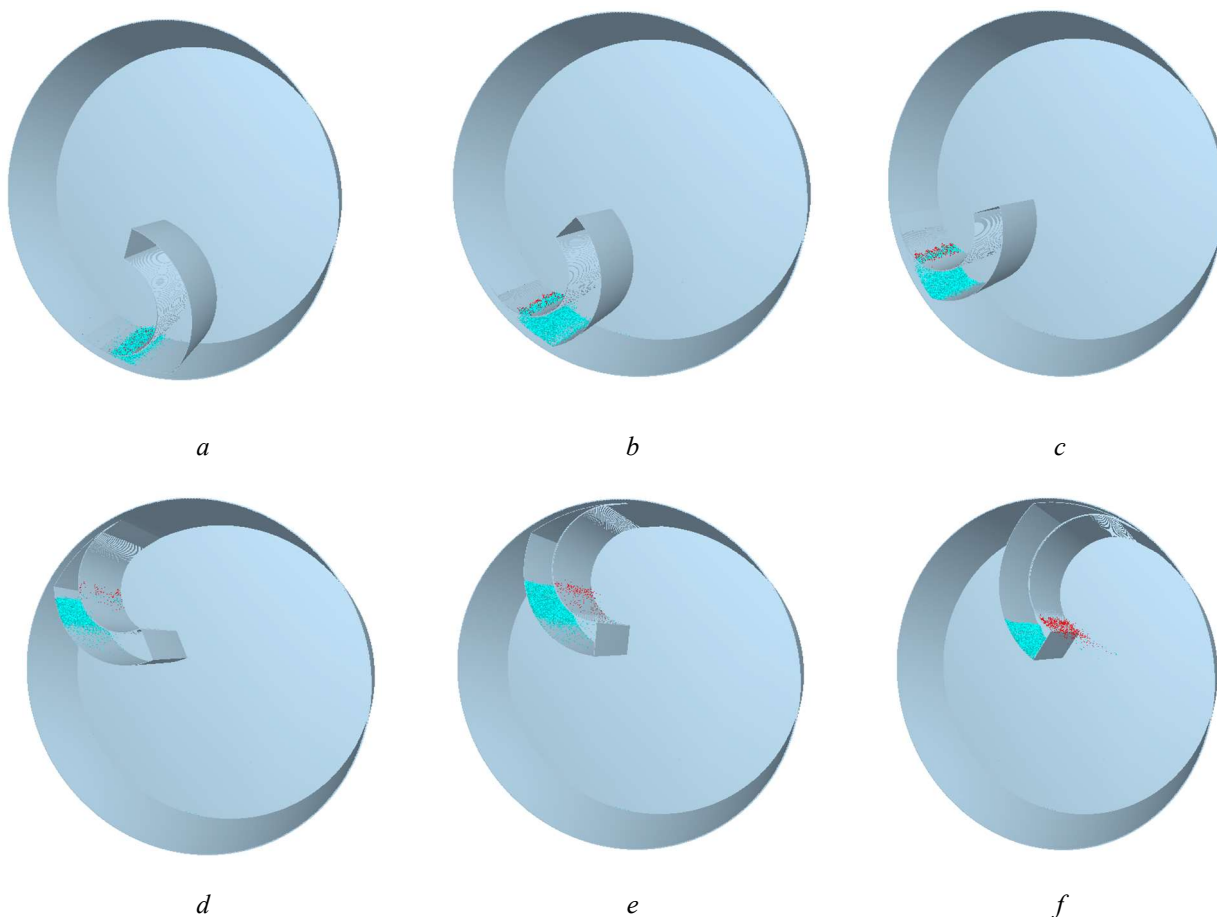


Рис. 2. Иллюстрации, характеризующие взаимодействие классифицируемого материала с просеивающей поверхностью цилиндрической лопасти в классифицирующей перегородке в различные промежутки времени  $t$ :  $a - t = 1,8$  с;  $b - t = 2$  с;  $c - t = 2,2$  с;  $d - t = 2,8$  с,  $e - t = 3$  с,  $f - t = 3,2$  с

Следует отметить, что процесс классификации материала в перегородке с цилиндрической просеивающей поверхностью начинается с  $1,7$  с

и заканчивается на  $3,2$  с, продолжительность составляет  $1,5$  с. Процесс на всем указанном проме-

жутке времени протекает активно с пересыпанием и перемещением материала по всей просеивающей поверхности. Кроме того, длина дуги цилиндрической просеивающей поверхности в 1,5 раза превышает длину плоской просеивающей поверхности.

Процесс классификации материала в перегородке с плоской просеивающей поверхностью начинается с 1,7 с и заканчивается на 3,2 с, продолжительность составляет 1,5 с. Процесс на промежутке времени с 1,7 с по 2,7 с протекает не активно на небольшом участке просеивающей поверхности у цилиндрической обечайки, пересыпания материала не наблюдается. Затем, с 2,7 с по 3,1 с начинается перемещение материала по небольшой части просеивающей поверхности с последующим отрывом от нее частиц, продолжительность составляет 0,4 с. Не задействованной в

процессе классификации оказывается до 2/3 просеивающей поверхности.

Отмеченные особенности взаимодействия рассмотренных просеивающих поверхностей с классифицируемым материалом позволяют сделать вывод о преимуществах цилиндрической просеивающей поверхности перед плоской, заключающихся в участии всей просеивающей поверхности в активном процессе классификации, полуторакратном превышении длины, большей чем в 3 раза продолжительности реализации активной части процесса классификации. Сопоставление результатов проведенных экспериментов при  $\psi_2 = 0,76 \psi_{кр}$ ,  $M_{м2} = 1$  кг и  $K_2 = 10\%$  показали в 1,56 раза большую эффективность процесса классификации на цилиндрической просеивающей поверхности ( $E_{ц} = 94,07\%$ ), чем на плоской ( $E_n = 60,28\%$ ).

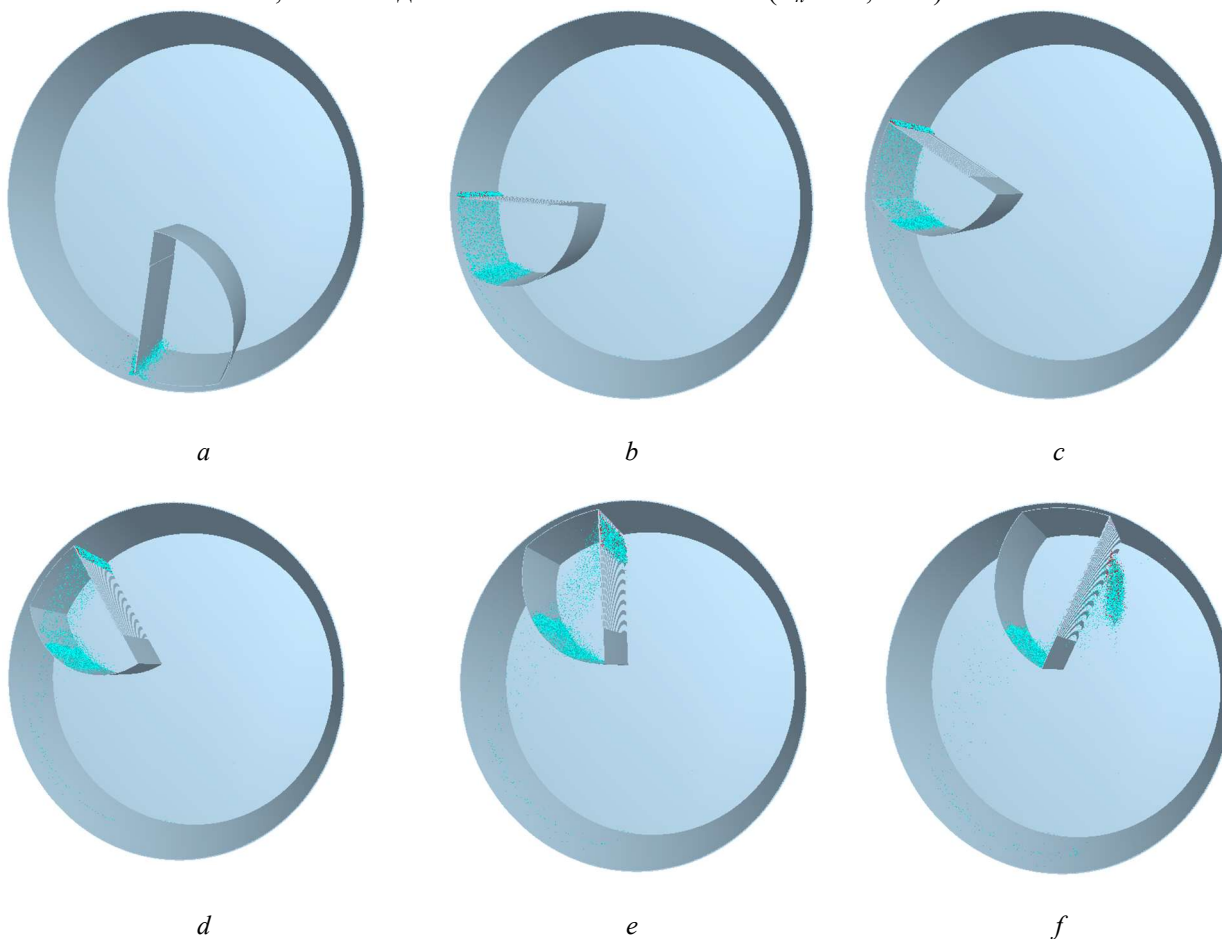


Рис. 3. Иллюстрации, характеризующие взаимодействие классифицируемого материала с плоской просеивающей поверхностью лопасти в классифицирующей перегородке в различные промежутки времени  $t$ :  $a - t = 1,8$  с;  $b - t = 2,4$  с;  $c - t = 2,6$  с;  $d - t = 2,8$  с,  $e - t = 3$  с,  $f - t = 3,2$  с

Полученные результаты позволяют с использованием выражения (4) определить параметры классифицирующей перегородки, обеспечивающие ее соответствие массовой производительности шаровой мельницы исходя из массы

поступающего на цилиндрическую просеивающую поверхность лопасти материала, содержания в нем верхнего класса частиц, количества лопастей, эффективности процесса классификации материала и частоты вращения ее корпуса. Так, при соответствующих центру плана значениях



исследуемых факторов  $\psi_2 = 0,76 \psi_{кр}$ ,  $M_{м4} = 1,4$  кг и  $K_2 = 10$  % эффективность процесса классификации на цилиндрической просеивающей поверхности составляет  $E_{ц} = 92,95$  %. Исходя из разработанной конструкции, в классифицирующей перегородке мельницы  $D \times L = 2 \times 10,5$  м располагается десять лопастей с цилиндрическими просеивающими поверхностями. Определенная по выражению (4) массовая производительность классифицирующей перегородки при указанных значениях факторов составляет 4,099 кг/с (14756 кг/ч), что соответствует показателям работы шаровых мельниц  $D \times L = 2 \times 10,5$  м, эксплуатируемых в различных отраслях промышленности. Выбор значений рассмотренных параметров осуществляется исходя из технологического регламента на процесс помола материала в мельнице.

#### Выводы.

1. Разработана эффективная, патентно-защищенная конструкция классифицирующей перегородки шаровой мельницы.

2. В программной среде *EDEM* проведены виртуальные эксперименты по реализации процесса классификации груболотого материала на цилиндрической и плоской просеивающих поверхностях классифицирующей перегородки для шаровой мельницы  $D \times L = 2 \times 10,5$  м.

3. С использованием метода математического планирования эксперимента, по плану ЦКРП-2<sup>3</sup> получено уравнение регрессии, адекватно описывающие эффективность процесса классификации груболотого материала в зависимости от относительной частоты вращения корпуса  $\psi$ , массы классифицируемого материала, подаваемого на просеивающую поверхность цилиндрической лопасти  $M_m$ , содержания  $K$  верхнего класса частиц в исходном материале, выполнен его анализ.

4. В программной среде *Maple* проведено исследование уравнений регрессии, получены графические зависимости, характеризующие изменение функции. Выполнен анализ эффективности процесса классификации груболотого материала в зависимости от варьируемых параметров при  $\psi = 0,642 \dots 0,878 \psi_{кр}$ ,  $M_m = 0,5 \dots 1$  кг,  $K = 5 \dots 15$  %. Определены рациональные области значений варьируемых факторов: для относительной частоты вращения корпуса -  $\psi = 0,7 \dots 0,8 \psi_{кр}$ ; для массы подаваемого на просеивающую поверхность цилиндрической лопасти классифицируемого материала -  $M_m = 0,8 \dots 1,2$  кг; для содержания верхнего класса частиц в исходном материале:  $K = 5 \dots 10$  %.

5. Проведено сравнение взаимодействия классифицируемого материала с цилиндрической и плоской просеивающими поверхностями лопастей в классифицирующих перегородках в

различные промежутки времени  $t$ . Преимущества конструкции классифицирующей перегородки с лопастями, имеющими цилиндрические просеивающие поверхности, перед плоскими, заключаются в участии всей просеивающей поверхности в активном процессе классификации, полуторакратном превышении ее длины и большей чем в три раза продолжительности реализации активной части процесса классификации. Сопоставление результатов проведенных экспериментов при  $\psi_2 = 0,76 \psi_{кр}$ ,  $M_{м2} = 1$  кг и  $K_2 = 10$  % показали в 1,56 раза большую эффективность процесса классификации груболотого материала на цилиндрической просеивающей поверхности ( $E_{ц} = 94,07$  %), чем на плоской ( $E_n = 60,28$  %).

6. Полученные результаты позволяют определить массовую производительность классифицирующей перегородки шаровой мельницы  $D \times L = 2 \times 10,5$  м с использованием известного выражения. Приведенные результаты расчета подтверждают, что разработанная конструкция классифицирующей перегородки с цилиндрическими просеивающими поверхностями лопастей обеспечивает достаточно высокую эффективность процесса классификации и массовую производительность, соответствующую требованиям технологических регламентов на работу шаровых мельниц  $D \times L = 2 \times 10,5$  м, эксплуатируемых в различных отраслях промышленности.

*Благодарность.* Статья подготовлена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Науменко Ю.В. Основы теорії режимів роботи барабаних млинів: монографія // Рівне.: СПД Зелент О. І., 2009. 282 с.
2. Latyshev S.S., Voronov V.V., Bogdanov V.S., Fadin Y.M., Bazhanova O.I., Maslovskaya A.N. Mathematical modeling of loads movement in lifter of intramill recirculation device inside tubular mill // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 022046.
3. Bogdanov V.S., Bogdanov D.V., Antsiferov S.I., Gorshkov P.S. Determination of gas-material flow parameters of ball mills // International Journal of Applied Engineering Research. 2014. Vol. 9. No 22. Pp. 15777–15789.
4. Севостьянов В.С. Энергосберегающие помольные агрегаты: монография // Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2006. 435 с.
5. Bogdanov V.S., Mordovskaya O.S., Voronov V.P., Khanin D.S., Kirilov I.V. Specifying the parameters of flow aspiration in the tube mill // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2014. Vol. 9. No. 11. Pp. 2371–2375.

6. Хардер Й. Развитие одноэтапных процессов измельчения в цементной промышленности // Цемент. Известь. Гипс. 2006 № 1. С.24–38.
7. Duda W.H. Cement data book / Wiesbaden, Berlin: Bauverlag. Wiesbaden, 1985.
8. Bogdanov V.S., Fadin Y.M., Lozovaya S.Y., Latyshev S.S., Bogdanov N.E., Vasilenko O.S. Ball mill power calculation with inclined partition. International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8. No. 3. Pp. 19031–19041.
9. Kovalyukh, S.V., Kovalyukh V. R. Outline the concept for their tubular-conical mill with a variable-speed electric drive // Worldcement.com. October 2009. Pp. 67–76.
10. Bogdanov V.S., Hanin S.I., Starchenko D.N., Sagitov I.A. Distinctive features of the relations between grinding equipment and devices inside ball mill body // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2014. Vol. 9. No. 11. Pp. 2344–2350. AdobeAcrobatReader. URL: [http://www.arpn-journals.com/jeas/research\\_papers/rp\\_2014/jeas\\_1114\\_1337.pdf](http://www.arpn-journals.com/jeas/research_papers/rp_2014/jeas_1114_1337.pdf). (дата обращения: 25.08.2020)
11. Bogdanov V.S., Dontsova Yu.A., Bogdanov N.E., Fadin Yu.M., Vöth S. Mechanics of crushing medium in ball mills with longitudinal-transverse motion of grinding bodies // ZKG International. 2019. No. 6, Pp 38–44.
12. Khanin S.I., Solodovnikov D.N., Lebakh A.V. Determining the loads acting onto a cylindrical classifier of a globe mill // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, Vol. 560 p. AdobeAcrobatReader. URL: <https://iop-science.iop.org/article/10.1088/1757-899X/560/1/012066/pdf> (дата обращения: 20.08.2020)
13. Ханин С.И., Мордовская О.С., Ханин Д.С. Пат. 2019127345 Российская Федерация, МПК В 02 С 17/06. Шаровая мельница с классифицирующей перегородкой; заявитель и патенто-обладатель БГТУ им. В.Г. Шухова. № 2019127345, заявл. 29.08.2019; опубл. 22.04.20, Бюл. № 12. 11 с.
14. Cai R., Hou Z., Zhao Y. Numerical study on particle mixing in a double-screw conical mixer // Journal Powder Technology. 2019. No 352. Pp. 193–208.
15. Moon I., Kim J., Roh J., Lee M.S. DEM Study of a Mixer for Core Manufacturing System // Journal Computer Aided Chemical Engineering. 2019. No. 46. Pp 799–804.
16. Bogdanov V.S., Khakhalev P.A., Bogdanov N.E., Gavrunov A.J. The application of EDEM software for design parameters calculation of a ball mill lining // Research Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 9. No. 11. Pp. 869–873.
17. DEM Solutions Ltd. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.dem-solutions.com/>.
18. Рекомендации по методам технологической наладки, испытанию помольных агрегатов в цементной промышленности // Всесоюзное государственное специализированное бюро по проведению пуско-наладочных и проектно-конструкторских работ в цементной промышленности. Л.: ОРГПРОЕКТЦЕМЕНТ, 1990. 155с.
19. Акционерное общество «Завод имени М. И. Платова». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.zaoplatov.ru/downloads/katalog-zavoda-imeni-m-i-platova.pdf>
20. Юдин Ю.В., Майсурадзе М.В., Водолазский Ф.В. Организация и математическое планирование эксперимента: учебное пособие / Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 124 с.
21. Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко В.Ф. Дробление, измельчение и грохочение и полезных ископаемых: учеб. пос. для вузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 2007. 301 с.

#### *Информация об авторах*

**Ханин Сергей Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры механического оборудования. E-mail: [dh@intbel.ru](mailto:dh@intbel.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Зыбин Роман Владимирович**, магистрант кафедры механического оборудования. E-mail: [zybin.roman97@yandex.ru](mailto:zybin.roman97@yandex.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Мордовская Ольга Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры механического оборудования. E-mail: [unique.ox@gmail.com](mailto:unique.ox@gmail.com). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

---

*Поступила 01.09.2020 г.*

© Ханин С.И., Зыбин Р.В., Мордовская О.С., 2020



\*Khanin S.I., Zybin R.V., Mordovskaya O.S.

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

\*E-mail: dh@intbel.ru

## INCREASING THE EFFICIENCY OF THE MATERIAL CLASSIFICATION PROCESS IN CLASSIFYING BALL MILLS PARTITION

**Abstract.** Ball mills are widely used for dispersion of materials in various industries, as they are characterized by ease of maintenance, operation and sufficiently high performance. To improve the process of inner-chamber classification of coarse-ground material, a new construction of the classifying partition with blades having cylindrical screening surfaces is proposed. The aim of the research is to substantiate the effectiveness of the application of the developed construction of the classifying partition in an industrial ball mill. The tasks of the research are to study the effectiveness of the developed construction of the classifying partitions on industrial ball mill. The tasks are solved of constructing and analyzing a regression equation that adequately describes the efficiency of the process of classifying coarse material with a cylindrical sieving surface depending on variable factors, determining rational areas of their values; comparing the efficiency of using blades with cylindrical and flat screening surfaces for inner-chamber classification of coarse material; confirmation of the possibility of providing the developed classifying partition with the mass productivity necessary for the operation of the mill. In the course of the work, the methods of simulation and mathematical modeling were used. As a result of the study, the efficiency of using a classifying partition with blades with cylindrical screening surfaces of a ball mill  $D \times L = 2 \times 10,5$  is substantiated.

**Keywords:** software environment, digital model, particle size, particle fractions, undersize product

### REFERENCES

1. Naumenko Yu.V. Fundamentals of the theory of modes in robotic drumming: monograph. Rivne : SPD Zelent O. I., 2009. 282 p.
2. Latyshev S.S., Voronov V.V., Bogdanov V.S., Fadin Y.M., Bazhanova O.I., Maslovskaya A.N. Mathematical modeling of loads movement in lifter of intramill recirculation device inside tubular mill. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. 022046.
3. Bogdanov V.S., Bogdanov D.V., Antsiferov S.I., Gorshkov P.S. Determination of gas-material flow parameters of ball mills. International Journal of Applied Engineering Research. 2014. Vol. 9. No 22. Pp. 15777–15789.
4. Sevostyanov V.S. Energy-saving grinding units [Energosberegayushchie pomol'nye agregaty]: monograph. Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov, 2006. 435 p. (rus)
5. Bogdanov V.S., Mordovskaya O.S., Voronov V.P., Khanin D.S., Kirilov I.V. Specifying the parameters of flow aspiration in the tube mill. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2014. Vol. 9. No. 11. Pp. 2371–2375.
6. Harder J. Development of one-stage grinding processes in the cement industry [Razvitie odnoetapnykh processov izmel'cheniya v cementnoj promyshlennosti]. Cement. Lime. Gypsum. 2006 No. 1. Pp. 24–38. (rus)
7. Duda W.H. Cement data book. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag. Wiesbaden, 1985.
8. Bogdanov V.S., Fadin Y.M., Lozovaya S.Y., Latyshev S.S., Bogdanov N.E., Vasilenko O.S. Ball mill power calculation with inclined partition. International Journal of Pharmacy and Technology. 2016. Vol. 8. No. 3. Pp. 19031–19041.
9. Kovalyukh S.V., Kovalyukh V.R. Outline the concept for their tubular-conical mill with a variable-speed electric drive. Worldcement.com. October 2009. Pp. 67–76.
10. Bogdanov V.S., Hanin S.I., Starchenko D.N., Sagitov I.A. Distinctive features of the relations between grinding equipment and devices inside ball mill body. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2014. Vol. 9. No. 11. Pp. 2344–2350. AdobeAcrobatReader. URL: [http://www.arpn-journals.com/jeas/research\\_papers/tp\\_2014/jeas\\_1114\\_1337.pdf](http://www.arpn-journals.com/jeas/research_papers/tp_2014/jeas_1114_1337.pdf). (date of treatment: 25.08.2020)
11. Bogdanov V.S., Dontsova Yu.A., Bogdanov N.E., Fadin Yu.M., Vöth S. Mechanics of crushing medium in ball mills with longitudinal-transverse motion of grinding bodies. ZKG International. 2019. No. 6. Pp. 38–44.
12. Khanin S.I., Solodovnikov D.N., Lebach A.V. Determining the loads acting onto a cylindrical classifier of a globe mill. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, Vol. 560 Pp. AdobeAcrobatReader. URL: <https://iop-science.iop.org/article/10.1088/1757-899X/560/1/012066/pdf> (date of treatment: 20.08.2020)

13. Khanin S.I., Mordovskaya O.S., Khanin D.S. Ball mill with classifier partition. Patent RF, no. 2019127345, 2020.
14. Cai R., Hou Z., Zhao Y. Numerical study on particle mixing in a double-screw conical mixer. *Journal Powder Technology*. 2019. No 352. Pp. 193–208.
15. Moon I., Kim J., Roh J., Lee M.S. DEM Study of a Mixer for Core Manufacturing System // *Journal Computer Aided Chemical Engineering*. 2019. No. 46. Pp. 799–804.
16. Bogdanov V.S., Khakhalev P.A., Bogdanov N.E., Gavrunov A.J. The application of EDEM software for design parameters calculation of a ball mill lining // *Research Journal of Applied Sciences*. 2014. Vol. 9. No. 11. Pp. 869–873.
17. DEM Solutions Ltd. [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.dem-solutions.com/>.
18. Recommendations on the methods of technological adjustment, testing of grinding units in the cement industry [Рекомендации по методам технологической наладки, испытанию помольных агрегатов в цементной промышленности]. All-Union State Specialized Bureau for Commissioning and Design Works in the Cement Industry. L.: ORGPROEKTSEMENT, 1990. 155 p. (rus)
19. Akcionernoe obshchestvo «Zavod imeni M. I. Platova». [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.zaoplatov.ru/downloads/katalog-zavoda-imeni-mi-platova.pdf> (rus)
20. Yudin Yu.V., Maisuradze M.V., Vodolazsky F.V. Organization and mathematical planning of the experiment [Организация и математическое планирование эксперимента]: a tutorial. Yekaterinburg: Ural Publishing House. University, 2018. 124 p. (rus)
21. Perov V.A., Andreev E.E., Bilenko V.F. Crushing, grinding and screening and mineral resources [Дробление, измельчение и грохочение и полезных ископаемых]: textbook. Nedra, 2007. 301 p. (rus)

#### *Information about the authors*

**Khanin, Sergei I.** DSc, Professor. E-mail: [dh@intbel.ru](mailto:dh@intbel.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Zybin, Roman V.** Master student. E-mail: [zybin.roman97@yandex.ru](mailto:zybin.roman97@yandex.ru). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Mordovskaya, Olga S.** PhD, Assistant professor. E-mail: [unique.ox@gmail.com](mailto:unique.ox@gmail.com). Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

---

*Received 01.09.2020*

#### **Для цитирования:**

Ханин С.И., Зыбин Р.В., Мордовская О.С. Повышение эффективности процесса классификации материала в классифицирующей перегородке шаровой мельницы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 9. С. 97–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-9-97-106

#### **For citation:**

Khanin S.I., Zybin R.V., Mordovskaya O.S. Increasing the efficiency of the material classification process in classifying ball mills partition. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No.9. Pp.97–106. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-9-97-10