

DOI: 10.12737/article_5940f019f3c7e4.41915523

Остановский А.А., канд. техн. наук, доц.,

Осипенко Л.А., канд. техн. наук, доц.

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал)
Донского государственного технического университета

Чирской А.С., канд. техн. наук, доц.,

Мартыненко И.А., канд. техн. наук, доц.

Шахтинский институт (филиал) Южно-Российского
государственного политехнического университета (НПИ) им. М. И. Платова

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОГО НЕСООТВЕТСТВИЯ ВЕТВЕЙ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА НА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ГОТОВОГО ПРОДУКТА В МЕЛЬНИЦАХ ДИНАМИЧЕСКОГО САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СИСТЕМЫ «МКАД»

ostanovskiy51@mail.ru

Приводятся результаты экспериментальных исследований зависимости гранулометрического состава мергеля от кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура в вертикальной мельнице динамического самоизмельчения системы «МКАД». Представлены графические зависимости этого процесса, даётся описание особенностей физической картины протекающего процесса

Ключевые слова: мельница, энергоэффективность, гранулометрический состав, фракция, кинематическое несоответствие, ротор, барабан, столб материала, циркулирующая мощность

Гранулометрический состав – важный показатель физических свойств и структуры материала. Кроме того состав готового продукта при измельчении отражает вероятностный процесс образования кусков (зёрен) различной крупности в результате их разрушения [1, 2].

Для получения готового продукта необходимого гранулометрического состава, который в дальнейшем используют для получения готового продукта, на обогатительных фабриках применяют широкий спектр различных измельчительных операций и операций по грохочению. Для этого используется разнообразное оборудование, удовлетворяющего технологическому процессу, для которого установлены основные закономерности формирования гранулометрического состава конечного продукта в зависимости от технологии, конструктивных и режимных параметров используемого для этого оборудования [3, 4].

В то же время для нового класса машин, к которому относятся вертикальные мельницы динамического самоизмельчения с замкнутым контуром системы «МКАД», такие закономерности не разработаны по причине короткого срока их создания, сдерживает их внедрение в различных отраслях народного хозяйства РФ и странах СНГ.

Так как процесс взаимодействия разрушаемых кусков и частиц в мельницах этой системы носит случайный характер, то на первоначальном этапе исследования получение экспериментальных данных о характере формирования гранулометрического состава продуктов помола

минерального сырья в зависимости от режимных и конструктивных параметров мельниц системы «МКАД» является актуальной задачей.

На рис. 1 представлена конструктивная схема вертикальной мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД», показывающая принцип её работы.

Характерной особенностью мельниц этой системы является то, что в них для разрушения кусков и частиц используется не только кинетическая энергия вращающегося ротора, но итак называемая «циркулирующая» энергия замкнутого контура [5-10].

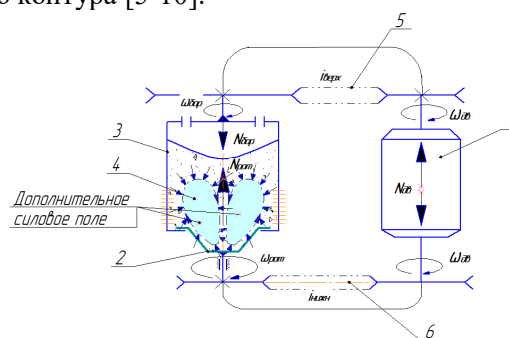


Рис. 1. Конструктивная схема вертикальной мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД»:

- 1 – приводной двигатель; 2 – ротор;
3 – барабан; 4 – активная зона измельчения;
5, 6 – верхняя и нижняя ветвь замкнутого контура

Это достигается тем, что за счёт одновременного вращения в одном направлении, но с разными угловыми скоростями ротора 2 и барабана 4 (кинематическом несоответствии верхней 5 и нижней 6 ветви замкнутого контура замкну-

того контура), осуществляется передача крутящего момента и мощности от приводного двигателя I к столбу измельчаемого материала производится по двум параллельным направлениям.

За счёт этого происходит вовлечение в движение частиц и кусков верхней части столба, которое отсутствует в мельницах системы «МАЯ» [11–13]. Это способствует тому, за счёт сил трения, возникающих при соприкосновении кусков материала с внутренней поверхностью вращающегося барабана 4, приводится во вращение верхняя часть столба измельчаемого материала, находящегося в барабане. Куски и частицы, находящиеся в верхней части столба материала, двигаясь к центру от внутренней поверхности барабана за счёт центробежных сил, приобретут дополнительную линейную скорость, что приведёт к росту их кинетической энергии. Рост скорости и кинетической энергии приведут к более интенсивному их перемешиванию и дополнительному силовому взаимодействию при их соприкосновении друг с другом. В результате этого происходит вовлечение в движение и взаимодействие большего объема частиц материала, исчезновению называемых «застойных» зон и их активное взаимодействие между собой. Так как скорость этих слоев в мельнице данной конструкции обеспечивается кинематическим несоответствием ветвей замкнутого контура, то интенсивность взаимодействия кусков и частиц, испытывающих дополнительное силовое воздействие, будет определять выходные параметры вертикальной мельницы динамического самоизмельчения – производительность, гранулометрический состав и энергозатраты. Вместе с этим вовлечение в движение дополнительного объема частиц верхней части столба будет сопровождаться нарастающим доминированием процесса истирания, что ведёт к изменению гранулометрического состава готового продукта. Таким образом, величина кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура позволит регулировать не только производительность, но и гранулометрический состав готового продукта

В таблице 1 представлены результаты, полученные при проведении экспериментальных исследований гранулометрического состава измельченного мергеля в мельнице системы «МКАД» со средним размером исходных кусков $d_{cp}=40$ мм [14] и графики зависимости влияния кинематического несоответствия $I_{кн}$ и высоты столба материала $H_{сл}$ на гранулометрический состав измельчения мергеля при диаметре выпускных отверстий в барабане $d_{вып}=5,0$ мм (рис. 2–7).

Графики зависимостей построены с помощью программы Advanced Grapher, которая позволяет по шести точкам эксперимента провести кривые, которые с минимальной погрешностью описывают образовавшийся гранулометрический состав в зависимости от величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура мельницы системы «МКАД».

Для мельницы системы «МКАД» гранулометрический состав измельченного мергеля при заданном диаметре выпускных отверстий в барабане будет зависеть от двух факторов: высоты слоя материала над ротором $H_{сл}$ и величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура $I_{кн}$. Высота слоя материала, определяющая давление на ротор, и кинематическое несоответствия ветвей замкнутого контура, влияющее на силовые и энергетические показатели процесса измельчения, будут обеспечивать протекание процесса самоизмельчения для мельницы рассматриваемой системы.

Анализ влияния кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура и высоты слоя материала в барабане на изменение гранулометрического состава фракции $5,0\div 3,0$ мм (рис. 2) показывает, что при высотах слоя 260, 380 и 500 мм с увеличением значения кинематического несоответствия наблюдается незначительный её прирост на $10\div 15$ %. При этом частицы, разрушенные и уменьшенные до размера этой фракции, мгновенно вытесняются через выпускные отверстия в барабане за его внешние границы. Другая часть объема находящихся в барабане частиц опускается вниз под действием их сил тяжести на ротор и под воздействием ребер вращающегося ротора совершают повторные движения по тороидальной траектории, взаимодействуя со встречающимися на пути их движения и постоянно уменьшаясь в размере в основном за счёт удара и раскалывания на более мелкие размеры.

Для фракции $3,0\div 1,2$ мм характерно более резкое увеличение её содержания в общем объеме (рис. 3) при увеличении кинематического несоответствия $I_{кн}$. Это можно объяснить тем, что, несмотря на выпуск незначительного числа частиц уменьшенных в размере частицы размерами менее диаметра выпускных отверстий $5,0\div 3,0$ мм в то же время их количество возросло при их раскалывании в первоначальный момент времени. Это приводит к тому, что их общая площадь возрастает. Следовательно, количество ударов и число соприкосновений их между собой также вырастет. В результате этого процесс будет протекать с нарастающей интенсивностью, приводящий к нарастанию по определённой зависимости содержания в готовом продукте

те помола фракции более мелкой фракции с размерами частиц $3,0 \pm 1,2$ мм.

Таблица 1

| №п/п | прот - прот | I к.н. | Нсл, мм | G _{вып} , кг/мин | Гранулометрический состав готового продукта | | | | |
|------|-------------|--------|---------|---------------------------|---|-----------|------------|-------------|----------|
| | | | | | По фракциям Δψ, % | | | | |
| | | | | | 5,0-3,0мм | 3,0-1,2мм | 1,2-0,63мм | 0,63-0,27мм | 0-0,27мм |
| 1.1 | 768-196,4 | 0,22 | 260 | 4,27 | 0,91 | 0,88 | 0,28 | 0,79 | 1,21 |
| 1.2 | | | | | 11,7 | 12,8 | 6,8 | 25,4 | 43,3 |
| 1.3 | | | | | 0,88 | 1,09 | 0,384 | 1,17 | 1,90 |
| 1.1 | 691,2-196,4 | 0,29 | 260 | 3,35 | 0,587 | 0,845 | 0,217 | 0,853 | 1,24 |
| 1.2 | | | | | 17,1 | 14,3 | 5,8 | 22,8 | 40,1 |
| 1.3 | | | | | 0,77 | 0,833 | 0,255 | 0,93 | 1,47 |
| 1.1 | 614,4-196,4 | 0,32 | 260 | 3,65 | 0,663 | 0,702 | 0,205 | 0,722 | 0,96 |
| 1.2 | | | | | 17,2 | 21,5 | 6,8 | 23,9 | 30,5 |
| 1.3 | | | | | 0,82 | 0,69 | 0,20 | 0,83 | 1,11 |
| 1.1 | 768-292,4 | 0,38 | 260 | 3,12 | 0,71 | 0,67 | 0,24 | 0,78 | 1,23 |
| 1.2 | | | | | 17,3 | 18,0 | 6,3 | 21,6 | 33,9 |
| 1.3 | | | | | 0,715 | 0,77 | 0,312 | 1,01 | 1,73 |
| 1.1 | 691,2-292,4 | 0,42 | 260 | 3,98 | 0,607 | 0,622 | 0,184 | 0,57 | 0,737 |
| 1.2 | | | | | 13,7 | 19,4 | 6,6 | 22,8 | 37,5 |
| 1.3 | | | | | 0,58 | 0,835 | 0,251 | 0,822 | 1,77 |
| 1.1 | 614,4-292,4 | 0,48 | 260 | 2,11 | 0,64 | 0,586 | 0,164 | 0,635 | 0,67 |
| 1.2 | | | | | 21,8 | 21,8 | 5,8 | 20,7 | 29,8 |
| 1.3 | | | | | 0,703 | 0,721 | 0,175 | 0,682 | 0,79 |
| 1.1 | 768-196,4 | 0,22 | 380 | 5,44 | 0,88 | 1,09 | 0,384 | 1,17 | 1,90 |
| 1.2 | | | | | 12,2 | 12,4 | 6,2 | 22,1 | 47,1 |
| 1.3 | | | | | 1,18 | 0,786 | 0,265 | 0,862 | 1,40 |
| 1.1 | 691,2-196,4 | 0,29 | 380 | 4,25 | 0,77 | 0,833 | 0,255 | 0,93 | 1,47 |
| 1.2 | | | | | 12,9 | 11,3 | 5,0 | 25,9 | 44,5 |
| 1.3 | | | | | 0,70 | 0,71 | 0,217 | 0,87 | 1,19 |
| 1.1 | 614,4-196,4 | 0,32 | 380 | 3,91 | 0,82 | 0,69 | 0,20 | 0,83 | 1,11 |
| 1.2 | | | | | 11,7 | 17,4 | 4,4 | 22,7 | 43,8 |
| 1.3 | | | | | 0,84 | 0,69 | 0,187 | 0,768 | 1,12 |
| 1.1 | 768-292,4 | 0,38 | 380 | 4,53 | 0,715 | 0,77 | 0,312 | 1,01 | 1,73 |
| 1.2 | | | | | 15,8 | 18,4 | 6,9 | 22,1 | 38,3 |
| 1.3 | | | | | 0,87 | 0,808 | 0,21 | 0,86 | 1,06 |
| 1.1 | 691,2-292,4 | 0,42 | 380 | 4,26 | 0,58 | 0,835 | 0,251 | 0,822 | 1,77 |
| 1.2 | | | | | 14,8 | 19,1 | 5,9 | 23,6 | 41,6 |
| 1.3 | | | | | 0,813 | 0,914 | 0,266 | 0,95 | 1,90 |
| 1.1 | 614,4-292,4 | 0,48 | 380 | 3,07 | 0,703 | 0,721 | 0,175 | 0,682 | 0,79 |
| 1.2 | | | | | 18,2 | 19,6 | 5,1 | 20,4 | 35,7 |
| 1.3 | | | | | 0,734 | 0,55 | 0,128 | 0,572 | 0,68 |
| 1.1 | 768-196,4 | 0,22 | 500 | 4,62 | 1,18 | 0,786 | 0,265 | 0,862 | 1,40 |
| 1.2 | | | | | 6,4 | 11,7 | 6,3 | 30,4 | 45,2 |
| 1.3 | | | | | 0,663 | 0,702 | 0,205 | 0,722 | 0,96 |
| 1.1 | 691,2-196,4 | 0,29 | 500 | 3,687 | 0,70 | 0,71 | 0,217 | 0,87 | 1,19 |
| 1.2 | | | | | 19,0 | 19,3 | 5,9 | 23,3 | 44,3 |
| 1.3 | | | | | 0,82 | 0,69 | 0,20 | 0,83 | 1,11 |
| 1.1 | 614,4-196,4 | 0,32 | 500 | 3,59 | 0,84 | 0,69 | 0,187 | 0,768 | 1,12 |
| 1.2 | | | | | 11,4 | 16,5 | 5,1 | 19,1 | 47,9 |
| 1.3 | | | | | 0,71 | 0,67 | 0,24 | 0,78 | 1,23 |
| 1.1 | 768-292,4 | 0,38 | 500 | 3,81 | 0,87 | 0,808 | 0,21 | 0,86 | 1,06 |
| 1.2 | | | | | 14,8 | 15,2 | 6,2 | 23,4 | 40,4 |
| 1.3 | | | | | 0,607 | 0,622 | 0,184 | 0,57 | 0,737 |
| 1.1 | 691,2-292,4 | 0,42 | 500 | 4,84 | 0,813 | 0,914 | 0,266 | 0,95 | 1,90 |
| 1.2 | | | | | 11,5 | 19,7 | 6,8 | 22,8 | 31,1 |
| 1.3 | | | | | 0,64 | 0,586 | 0,164 | 0,635 | 0,67 |
| 1.1 | 614,4-292,4 | 0,48 | 500 | 2,66 | 0,734 | 0,55 | 0,128 | 0,572 | 0,68 |
| 1.2 | | | | | 21,2 | 22,1 | 5,2 | 21,6 | 29,9 |
| 1.3 | | | | | 0,64 | 0,586 | 0,164 | 0,635 | 0,67 |

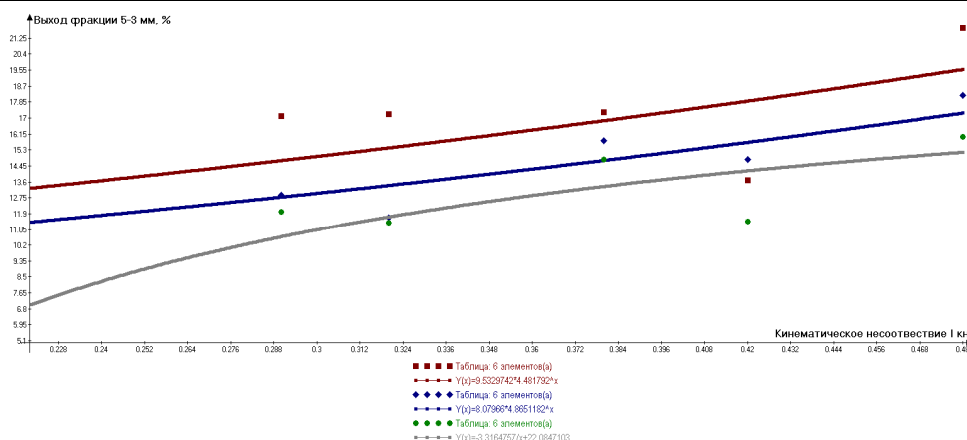


Рис. 2. Зависимость выхода фракции 5,0÷3,0 мм мергеля с исходными кусками $d_{ср} = 40$ мм от величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура и высоты слоя материала в барабане; диаметр выпускных отверстий в барабане $d_{вып} = 5,0$ мм: красная линия – $H_{сл} = 260$ мм; синяя линия $H_{сл} = 380$ мм; серая линия $H_{сл} = 500$ мм

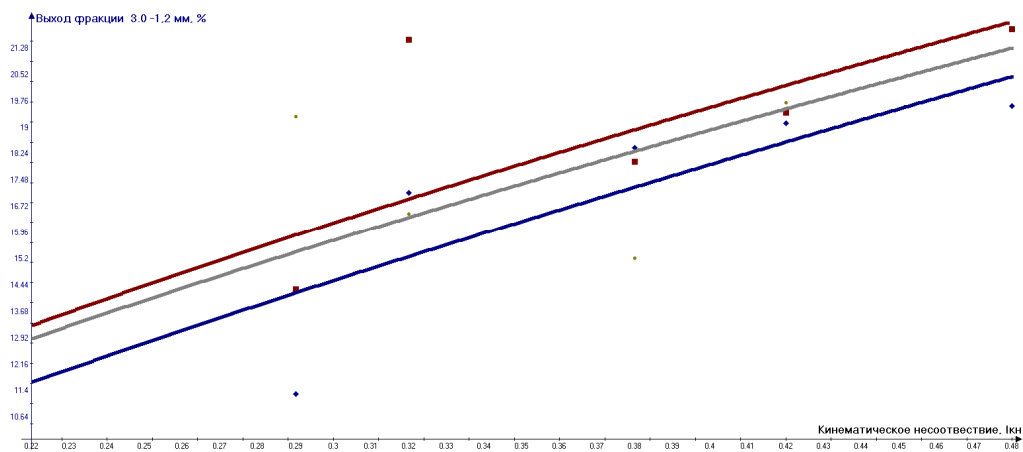


Рис. 3. Зависимость выхода фракции 3,0÷1,2 мм мергеля со средним размером исходных кусков $d_{cp}=40$ мм от величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура и высоты слоя материала в барабане; диаметр выпускных отверстий в барабане $d_{вып}=5,0$ мм красная линия – $H_{сл}=260$ мм; синяя линия – $H_{сл}=380$ мм; серая линия – $H_{сл}=500$ мм

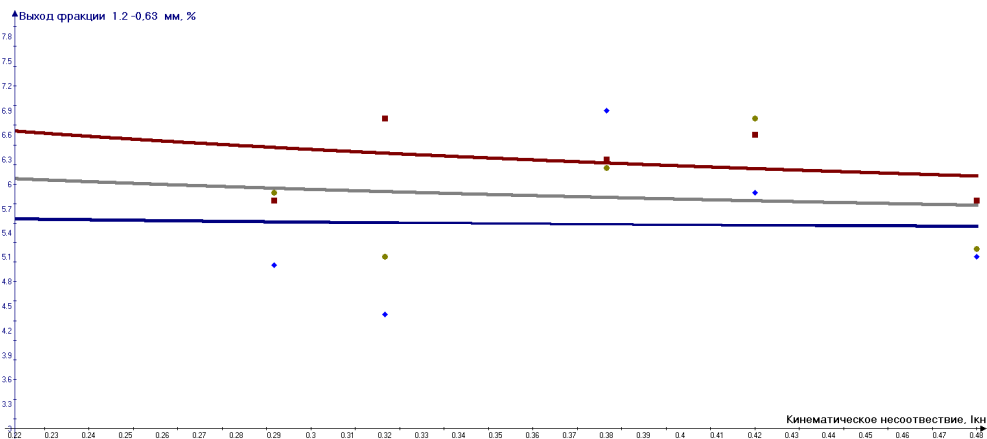


Рис. 4. Зависимость выхода фракции 1,2÷0,63 мм мергеля со средним размером исходных кусков $d_{cp}=40$ мм от величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура и высоты слоя материала в барабане; диаметр выпускных отверстий в барабане $d_{вып}=5,0$ мм красная линия – $H_{сл}=260$ мм; синяя линия – $H_{сл}=380$ мм; серая линия $H_{сл}=500$ мм

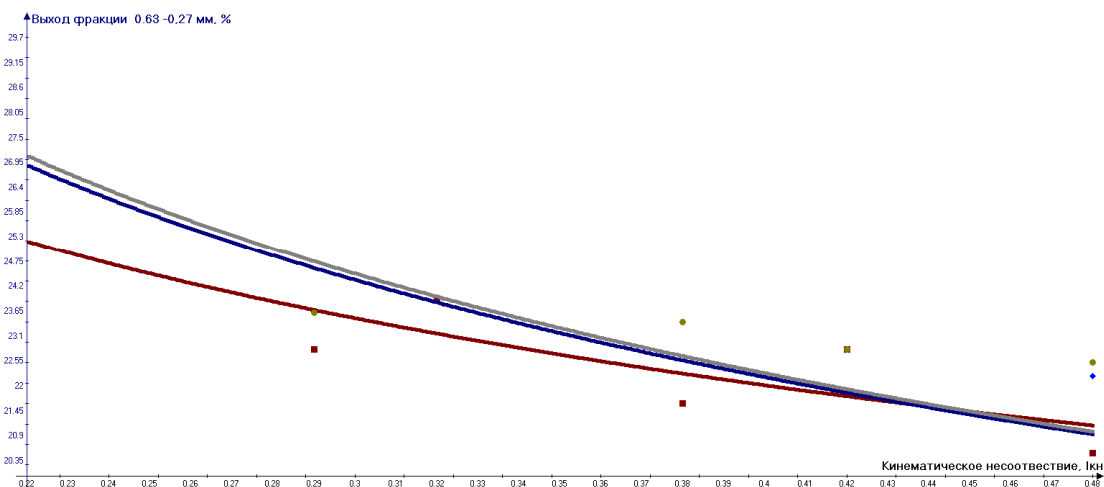


Рис. 5. Зависимость выхода фракции 1,2÷0,63 мм мергеля со средним размером исходных кусков $d_{cp}=40$ мм от величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура и высоты слоя материала в барабане; диаметр выпускных отверстий в барабане $d_{вып}=5,0$ мм красная линия – $H_{сл}=260$ мм; синяя линия – $H_{сл}=380$ мм; серая линия – $H_{сл}=500$ мм

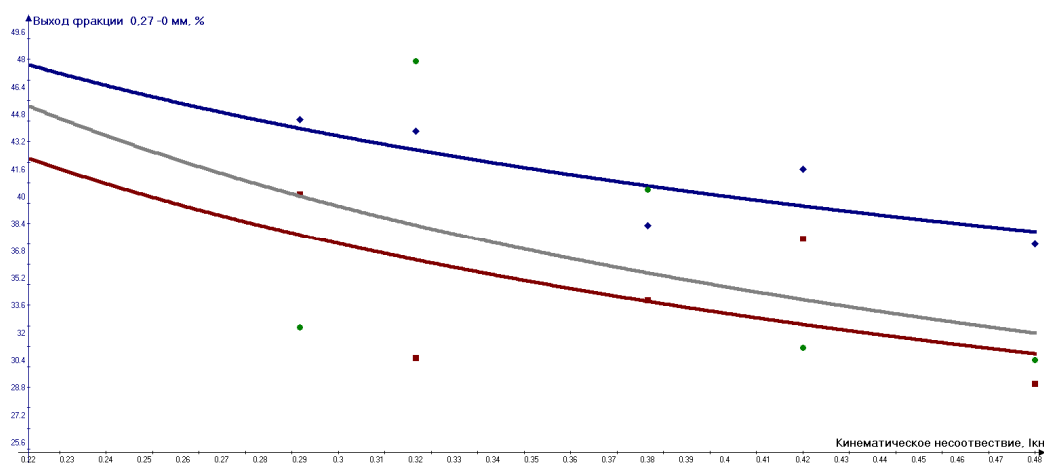


Рис. 6. Зависимость выхода фракции $0,27 \pm 0$ мм от величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура и высоты слоя материала в барабане; диаметр выпускных отверстий в барабане $d_{вып} = 5,0$ мм
красная линия – $H_{сл} = 260$ мм; синяя линия – $H_{сл} = 380$ мм; серая линия – $H_{сл} = 500$ мм

Поэтому, когда угловая скорость ротора (частота) начинает превышать угловую скорость барабана на величину $\Delta n = (n_{рот} - n_{бар}) > 400$ об/мин при заданной угловой скорости барабана, то происходит проскальзывание частиц слоев верхнего и нижнего столба относительно друг друга. В результате такого взаимодействия интенсивность их контактов снижается. Следовательно, объем выхода частиц самых мелких фракций $0,27 \pm 0$ мм будет снижаться, а более крупных возрастать.

Для фракции $1,2 \pm 0,63$ мм характерной особенностью является практическое постоянное не зависящее от величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура содержание этой фракции в готовом продукте (рис. 4). Это обусловлено тем, что в какой-то момент при определенных условиях процесс измельчения приобретает равновесный характер, когда процессы раскалывания и истирания равновесны, но уже обозначился плавный переход в процессы соращения размеров частиц в основном за счёт их истирания между собой.

Для фракции $0,63 \pm 0,27$ и $0,27 \pm 0$ мм (рис. 5, б) характерно то, что образовавшиеся частицы после предыдущих процессов будут преобладать в общем объёме циркулирующей по тороидальной траектории массы кусковатой формы, находящейся в барабане, после первичного измельчения примут шаровую или овальную форму. Поэтому каждая вновь образованная частица при движении вдоль стенок внутренней полости барабана будет соприкасаться не по всей поверхностью, с ней только в одной отдельной точке.

Можно утверждать, что при таких значениях кинематического несоответствия изменение размеров частиц будет происходить главным образом преобладания процессов не раскалыва-

ния, а истирания, который приводит к большему объёму выхода самых мелких фракций. При возрастании величины кинематического несоответствия, которая происходит за счёт увеличения угловой скорости ротора, частицы материала, находящиеся в полости барабана и примыкающие к его стенкам начинают проскальзывать относительно неё. Проскальзывание частиц приводит к тому, что эти частицы не принимают участие в перемещении по наиболее выгодной для осуществления процесса самоизмельчения тороидальной траектории. Поэтому циркуляция частиц происходит менее интенсивно в вертикальной плоскости, и процесс самоизмельчения начинает затухать по мере возрастания величины кинематического несоответствия. Поэтому по возрастанию величины кинематического несоответствия более $I_{кн} > 0,38$ будет снижаться интенсивность взаимодействия частиц, а выход фракций $0,27 \pm 0$ и $0,63 \pm 0,27$ мм в процентном соотношении будет уменьшаться.

Таким образом, по полученным данным образования гранулометрического состава готового продукта можно с большой долей вероятности можно утверждать, что процесс измельчения в мельнице системы «МКАД» характеризуется тремя сопроцессами. При этом для самых крупных фракций 5 ± 3 и $3 \pm 1,2$ мм процесс измельчения исходного материала протекает в основном за счёт раскалывания и удара, для фракций $1,2 \pm 0,63$ является переходным (равновесным) процессом, при котором увеличение $I_{кн}$ не влияет на изменение этой фракции и интенсивным истиранием, при котором увеличение $I_{кн}$ приводит к существенному снижению содержания в продукте помола содержание наиболее мелких фракций $0,63 \pm 0,27$ и $0,27 \pm 0$ мм.

Исследование влияния высоты слоя на формирование гранулометрического состава продукта измельчения показывает следующее.

Высота столба материала над ротором $H_{сл}$ будет влиять на выход фракций самых мелких фракций $0,27 \div 0$ и $0,63 \div 0,27$ мм. Наибольший её выход происходит при высоте $H_{сл} = 380$ мм, а минимальная при слоях высотам соответственно 500 и 260 мм – красная и синяя линия. При этом зависимость выхода этих фракций при высотах 380 мм и 500 мм отличаются не более $4 \div 7$ %. Выход этих фракций при высоте 260 мм во всех случаях меньше в среднем на $10 \div 15$ %, чем при высоте 380–500 мм. При высоте более 500 мм выход фракций $0,27 \div 0$ и $0,63 \div 0,27$ мм начинает снижаться более резко. Это можно объяснить следующим образом. При высотах $H_{сл} = 260$ мм и менее процесс самоизмельчения происходит менее интенсивно, чем при больших высотах. Это происходит потому, что с уменьшением высоты столба материала над ротором, снижается давление, которое оказывают верхние слои материал на нижний слой, расположенные над ротором, которое должно находиться в пределах $0,005–0,05$ МПа [13].

Кроме того, в исследованиях было установлено, что при высотах более 500 мм при одновременном вращении ротора и барабана при средней крупности исходного материала, равной $d_{ср} = 40$ мм, в средней части столба образуются пустоты, и целостность столба нарушается. Поэтому образование этих пустот нарушает циркуляцию материала, интенсивность взаимодействия кусков и частиц снижается, а объем выхода мелких фракций снижается.

Следовательно, высота столба материал над ротором в пределах $H_{сл} = 380 \div 500$ мм является наиболее оптимальной, при которой способ самоизмельчения будет осуществляться с большим выходом самых мелких фракций ($45 \div 70$ %).

Анализ зависимостей отсева готового продукта от высоты столба материала, находящегося над ротором, и величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура для фракции $1,2 \div 0,63$ мм показывает, что его состав остается практически неизменным для всех диаметров выпускных отверстий и составляет в среднем $5–7$ % от общего выхода фракций. Это явление объясняется следующим образом.

В начальный период самоизмельчения, когда протекает преимущественно процесс раскалывания исходных кусков за счет центробежных сил вращающегося ротора, наступает процесс перераспределения одного процесса с преимущественным способом раскалывания частиц и переход к преобладанию процесса их истирания. Этот переходный процесс представлен на рис.

5.15–5.19, где процесс образования фракции $1,2 \div 0,63$ мм имеет практическую линейную зависимость, близкую к функции $y_3 = f(C)$ для высоты столба 380 и 500 мм и $y_2 = f(-ax + C)$ для высоты 260 мм. Характер последней зависимости объясняется менее интенсивным взаимодействием частиц из-за ослабевающего влияния давления верхних слоев на нижние.

Анализ зависимости выхода самых крупных фракций $3,0 \div 1,2$ мм и фракции $10,0 \div 3,0$ мм от высоты столба материала над ротором и величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура для всех размеров выпускных отверстий имеют полиномиальную возрастающую зависимость типа

$$y_1 = f(a_1x^2 + b_1x + C_1), \quad (1)$$

Т.е. с возрастанием величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура увеличивается в готовом продукте выход фракций $10,0 \div 3,0$ и $3,0 \div 1,2$ мм.

Причина такого протекания процесса объясняется тем, что в первоначальный период процесса самоизмельчения для кусков преобладающим способом сокращения их размеров является раскалывание, которое осуществляется за счет кинетической энергии вращающегося ротора. Поэтому с увеличением угловой скорости ротора, а с ним и величины кинематического несоответствия объем выхода этих фракций будет возрастать.

Анализ зависимость выхода самых крупных фракций $3,0 \div 1,2$ мм и фракции $10,0 \div 3,0$ мм от высоты столба материала над ротором и величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура для всех размеров выпускных отверстий имеют полиномиальную возрастающую зависимость типа

$$y_2 = f(a_2x^2 + b_2x + C_2), \quad (2)$$

Т.е. с возрастанием величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура увеличивается в готовом продукте выход фракций $10,0 \div 3,0$ и $3,0 \div 1,2$ мм.

Это объясняется тем, что в первоначальный момент времени и в начале процесса самоизмельчения преобладающим способом сокращения их размеров является раскалывание за счет кинетической энергии вращающегося ротора. Поэтому с увеличением угловой скорости ротора, а с ним и величины кинематического несоответствия удельный вес выхода этих фракций будет возрастать.

Выводы.

Результаты экспериментальных исследований влияния конструктивных и режимных параметров на формирование гранулометрического

измельченного материала (мергеля) для вертикальной мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД» позволили сделать следующие выводы.

1. Конструктивные и режимные параметры влияют на формирование гранулометрического состава измельченного материала, что позволяет путём их регулирования в процессе работы мельницы получать в соответствии с требованиями производства необходимый состав этого продукта, что невозможно достичь в мельницах системы «МАЯ».

2. Установлены зависимости гранулометрического состава готового продукта при измельчении мергеля от основных влияющих факторов – высоты столба материала, находящегося над ротором, кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура и диаметра выпускных отверстий в барабане измельчительного устройства.

3. При увеличении кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура с $I_{\text{кн}} = 0,38 - 0,48$ и частоте оборотов ротора более 292 об/мин интенсивность взаимодействия частиц внутри барабана снижается. Это объясняется тем, что за счет центробежных сил вращающегося ротора частицы, ударяясь о внутреннюю поверхность барабана, раскалываются на ней и образуют липкий мелкий слой измельченных частиц, который препятствует эвакуации их из мельницы, что снижает производительность и удельный вес наиболее мелких фракций размером $0,63 \pm 0$ мм.

4. Образование большего содержания не эвакуируемых фракций в барабане (переизмельчение) приводит к нарушению целостности столба материала над ротором как единого объекта, что нарушает процесс возврата части подведенной к нему мощности и рекуперации её, которая реализуется при её передаче по двум параллельным направлениям от приводного двигателя. Это ведёт к снижению производительности, росту энергозатрат и изменению гранулометрического состава готового продукта.

5. Установлены соотношения высоты слоя над ротором и среднего размера исходных кусков материала, при которых достигаются максимальные значения производительности и гранулометрического состава готового продукта.

6. Полученные экспериментальные поданные, показывающие формирование гранулометрического состава измельченного материала (мергеля) в зависимости от кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура и высоты слоя материала в барабане позволят их использовать при проектировании мельниц си-

стемы «МКАД», в конструкции которых имеется замкнутый контур.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Клыков Ю.Г. Селективное измельчение минерального сырья. Владикавказ: Терек, 1997, 155 с.
2. Сабиев У.К., Фомин В.В., Сабиев И.У. Повышение однородности гранулометрического состава измельченного материала в измельчителе центробежно-роторного действия // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. №4(78). С. 82–84.
3. Смирнов С.Ф., Мизонов В.Е., Красильников А.Г., Жуков В.П. Ячеечная модель измельчения материала в трубной мельнице замкнутого цикла // Известия вузов. Химия и хим. технология. 2007. Т. 50, вып. 3. С. 98–100.
4. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1980. 415 с.
5. Пат. на изобретение №2465960 Российская Федерация. МПК В02С13/14. Измельчитель динамического самоизмельчения / Дровников А. Н., Остановский А. А., Никитин Е. В., Павлов И. А., Осипенко Л. А., Агафонов Н. А.; Заявка: 2011106231/13, заявл. 17.02.2011; Патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)", опубл. 10.11 2012 г. Бюл. №31. 5 с.
6. Пат. на изобретение № 2496581 Российская Федерация. МПК В02С13/14. Мельница / Дровников А. Н., Остановский А. А., Маслов Е. В., Бурков Н. В., Романенко Г. Н.; Заявка: 2012124864/13, заявл. 14.06.2012; Патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)" (RU), Опубл. 10.11 2012 г. Бюл. №31. 5 с.
7. Пат. на изобретение № 2520008 Российская Федерация. МПК В02С13/14. Измельчитель динамического самоизмельчения материала / Дровников А. Н., Остановский А. А., Маслов Е. В., Рыбальченко А. Н.; 2013105689/13; заявл. 11.02. 2013; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса" (ФГБОУ ВПО "ЮРГУЭС"), опубл. 20.06 2014 г., Бюл. №17. 4 с.

8. Пат.на изобретение №2526668 Российская Федерация МПК В02С13/14. Устройство для измельчения материала/ Дровников А. Н., Остановский А. А. Заявка: 2012149328/13, заявл. 19.11.2012; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса" (ФГБОУ ВПО "ЮРГУЭС") (RU) Опубликовано: 27.08.2014. Бюл. №19. 5 с.

9. Пат. на изобретение №2558205 Российская Федерация МПК В02С13/14. Мельница. Дровников А. Н., Остановский А. А., Никитин Е. В., Маслов Е. В., Городнянский В. М., Черксов В. Ю., Заявка: 2014110456/13, заявл. 18.03.2014; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ), опублик. 27.07.2015, Бюл. №21. 6 с.

10. Пат. на изобретение №2539200 Российская Федерация МПК В02С13/14 Способ измельчения материалов и мельница для его осуществления. Дровников А.Н., Исаков В.С., Остановский А.А., Маслов Е. В. Заявка: 2013136461/13, 02.08.2013, дата подачи заявки: 02.08.2013; Патентообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)" (RU), опублик. : 20.01.2015.Бюл. №21. 6 с.

11. А. с. № 651845 (СССР), МПК4 В 02 С13/14. Способ измельчения материала / Ягупов А.В.; заявитель Северо-Кавказский горно - металлургический институт. № 2331562; заявл. 09.06 1976, опублик. 15.03. 1979, Бюл. №11. 3 с.

12. Ягупов А.В. Новый способ измельчения руд // Горный журнал. 1976. №11. С.71-73.

13. А.с. № 710632 (СССР), МКИ В 02 С 13/00. Мельница динамического самоизмельчения «МАЯ»/ Ягупов А. В.; заявитель Северо-Кавказский горно-металлургический институт, заявка № 2325134; заявл. 17.02. 1976, опублик. 25.01.1980, Бюл. №3. 4 с.

14. А. с.937002 Мельница динамического самоизмельчения "МАЯ"; Ягупов А.В. Заявка: 3003970, 13.11.1980. заявитель Северо-Кавказский горно-металлургический институт. Опубликовано: 23.06.1982. Заявитель: Северо-Кавказский горно-металлургический институт.

15. Остановский А.А., Маслов Е.В. К определению производительности и удельных энергозатрат в вертикальной мельнице динамического самоизмельчения с силовым замкнутым контуром // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. 2015. № 3. С. 59–67.

Ostanovskiy A.A., Osipenko L.A., Chirskoy A.S., Martinenko I.A.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE KINEMATIC INCONSISTENCY OF BRANCHES OF A CLOSED LOOP ON THE GRANULOMETRIC COMPOSITION OF THE FINISHED PRODUCT IN MILLS DYNAMIC SELF-CRUSHING OF THE «MCAD» SYSTEM

The results of experimental studies of the dependence of the granules composition of marl on the kinematic inconsistency of branches of a closed contour in a vertical mill of dynamic self-crushing of the "MCAD" system are presented. Graphic dependencies of this process are presented, a description is given of the features of the physical picture of the ongoing process

Key words: mill, energy efficiency, particle size distribution, fraction, kinematic mismatch, rotor, drum, material column, circulating power

Остановский Александр Аркадьевич, докторант, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технические системы ЖКХ и сферы услуг».

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета.

Адрес: Россия, 346500, г. Шахты Ростовской области, ул. Шевченко, 147

E-mail: Ostanovskiy51@mail.ru

Осипенко Людмила Аркадьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технические системы ЖКХ и сферы услуг».

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета.

Адрес: Россия, 346500, г. Шахты Ростовской области, ул. Шевченко, 147

E-mail: aaanet@mail.ru

Чирской Александр Семёнович, кандидат технических наук, доцент.
Шахтинский институт (филиал) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ)
им. М. И. Платова
Адрес: Россия, 346500, г. Шахты, Ростовская обл., пл. Ленина №1.
E-mail: alex.chir65@mail.ru

Мартыненко Игорь Андреевич, кандидат технических наук, доцент.
Шахтинский институт (филиал) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ)
им. М. И. Платова
Адрес: Россия, 346500, г. Шахты, Ростовская обл., пл. Ленина №1.
E-mail: geomech1@yandex.ru