

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 и так называемая «циркулирующая» энергия замкнутого контура [5-10].

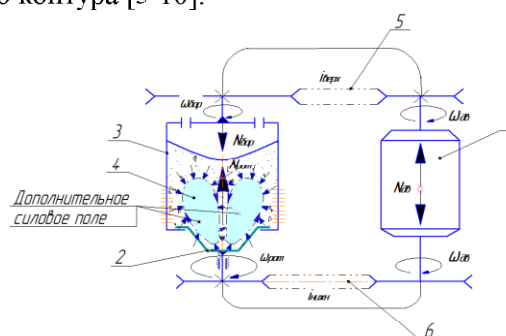


Рис. 1. Конструктивная схема вертикальной мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД»:

- 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  $d_{ср}=40$  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 несоответствие 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  $5,0\pm 3,0$  мм (рис. 2) показывает, что при высотах слоя 260, 380 и 500 мм с увеличением значения кинематического несоответствия наблюдается незначительный её прирост на  $10\pm 15$  %. 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  $3,0\pm 1,2$  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  $5,0\pm 3,0$  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  $3,0 \div 1,2$  мм.

Таблица 1

№п/п	прот - прот	I к.н.	Нсл, мм	G <sub>вых</sub> , 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	<u>0,91</u>	<u>0,88</u>	<u>0,28</u>	<u>0,79</u>	<u>1,21</u>
1.2					11,7	12,8	6,8	25,4	43,3
1.3					12,2	12,4	6,2	22,1	47,1
1.1	691,2-196,4	0,29	260	3,35	<u>0,587</u>	<u>0,845</u>	<u>0,217</u>	<u>0,853</u>	<u>1,24</u>
1.2					17,1	14,3	5,8	22,8	40,1
1.3					12,9	11,3	5,0	25,9	44,5
1.1	614,4-196,4	0,32	260	3,65	<u>0,663</u>	<u>0,702</u>	<u>0,205</u>	<u>0,722</u>	<u>0,96</u>
1.2					17,2	21,5	6,8	23,9	30,5
1.3					11,7	17,4	4,4	22,7	43,8
1.1	768-292,4	0,38	260	3,12	<u>0,71</u>	<u>0,67</u>	<u>0,24</u>	<u>0,78</u>	<u>1,23</u>
1.2					17,3	18,0	6,3	21,6	33,9
1.3					15,8	18,4	6,9	22,1	38,3
1.1	691,2-292,4	0,42	260	3,98	<u>0,607</u>	<u>0,622</u>	<u>0,184</u>	<u>0,57</u>	<u>0,737</u>
1.2					13,7	19,4	6,6	22,8	37,5
1.3					14,8	19,1	5,9	23,6	41,6
1.1	614,4-292,4	0,48	260	2,11	<u>0,64</u>	<u>0,586</u>	<u>0,164</u>	<u>0,635</u>	<u>0,67</u>
1.2					21,8	21,8	5,8	20,7	29,8
1.3					18,2	19,6	5,1	20,4	35,7
1.1	768-196,4	0,22	380	5,44	<u>0,88</u>	<u>1,09</u>	<u>0,384</u>	<u>1,17</u>	<u>1,90</u>
1.2					12,2	12,4	6,2	22,1	47,1
1.3					11,8	11,7	6,3	30,4	45,2
1.1	691,2-196,4	0,29	380	4,25	<u>0,77</u>	<u>0,833</u>	<u>0,255</u>	<u>0,93</u>	<u>1,47</u>
1.2					12,9	11,3	5,0	25,9	44,5
1.3					19,0	19,3	5,9	23,3	44,3
1.1	614,4-196,4	0,32	380	3,91	<u>0,82</u>	<u>0,69</u>	<u>0,20</u>	<u>0,83</u>	<u>1,11</u>
1.2					11,7	17,4	4,4	22,7	43,8
1.3					11,4	16,5	5,1	19,1	47,9
1.1	768-292,4	0,38	380	4,53	<u>0,715</u>	<u>0,77</u>	<u>0,312</u>	<u>1,01</u>	<u>1,73</u>
1.2					15,8	18,4	6,9	22,1	38,3
1.3					14,8	15,2	6,2	23,4	40,4
1.1	691,2-292,4	0,42	380	4,26	<u>0,58</u>	<u>0,835</u>	<u>0,251</u>	<u>0,822</u>	<u>1,77</u>
1.2					14,8	19,1	5,9	23,6	41,6
1.3					11,5	19,7	6,8	22,8	31,1
1.1	614,4-292,4	0,48	380	3,07	<u>0,703</u>	<u>0,721</u>	<u>0,175</u>	<u>0,682</u>	<u>0,79</u>
1.2					18,2	19,6	5,1	20,4	35,7
1.3					21,2	22,1	5,2	21,6	29,9

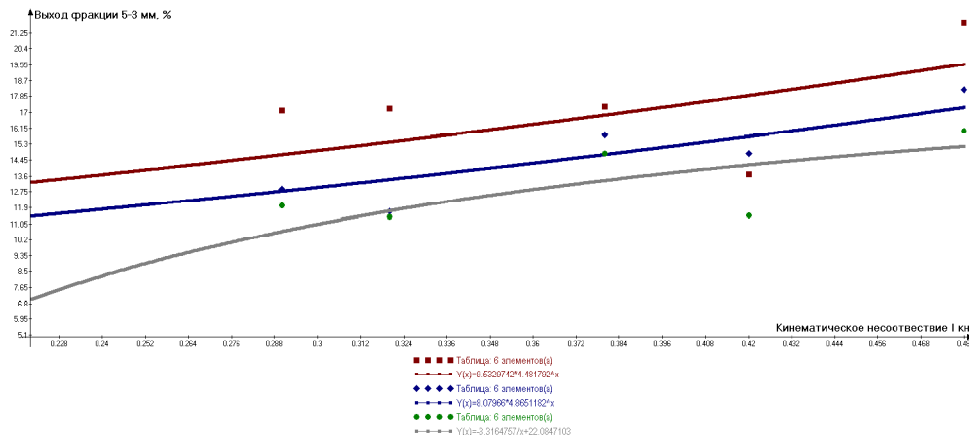


Рис. 2. Зависимость выхода фракции 5,0÷3,0 мм мергеля с исходными кусками  $d_{ср}=40$  мм от величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура и высоты слоя материала в барабане; диаметр выпускных отверстий в барабане  $d_{вып}=5,0$  мм: красная линия –  $H_{сл}=260$  мм; синяя линия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

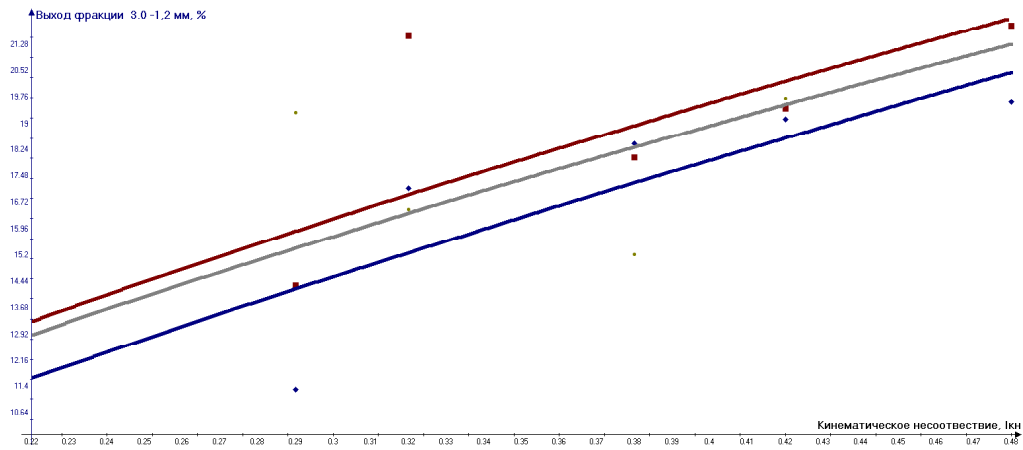


Рис. 3. Зависимость выхода фракции  $3,0 \div 1,2$  мм мергеля со средним размером исходных кусков  $d_{cp}=40$  мм от величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура и высоты слоя материала в барабане; диаметр выпускных отверстий в барабане  $d_{вып}=5,0$  мм красная линия –  $H_{сл}=260$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

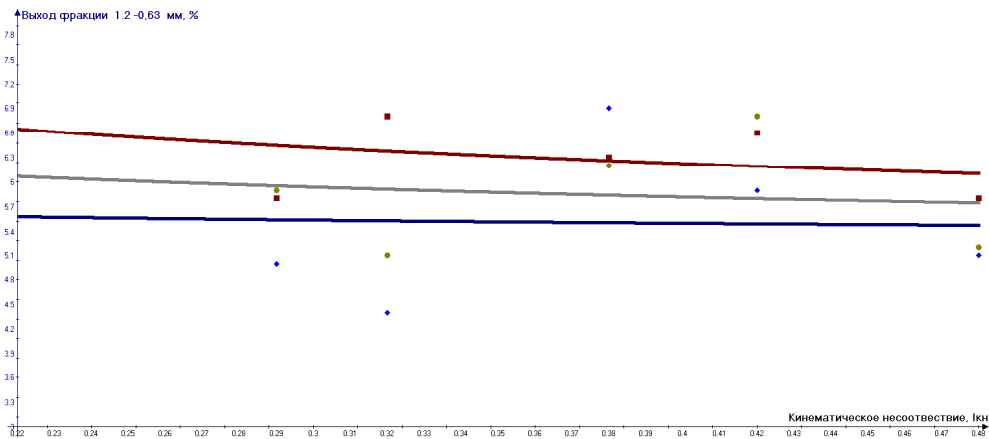


Рис. 4. Зависимость выхода фракции  $1,2 \div 0,63$  мм мергеля со средним размером исходных кусков  $d_{cp}=40$  мм от величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура и высоты слоя материала в барабане; диаметр выпускных отверстий в барабане  $d_{вып}=5,0$  мм красная линия –  $H_{сл}=260$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

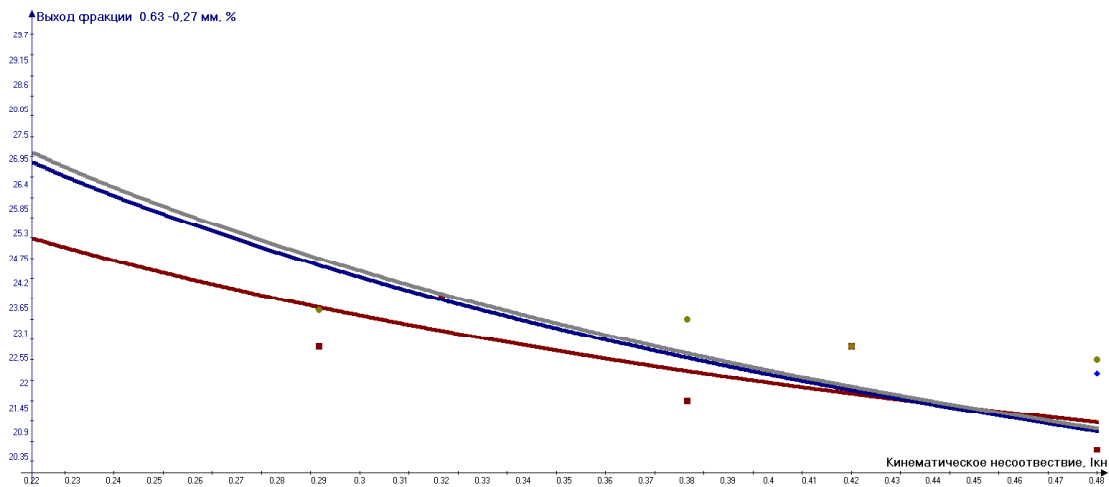


Рис. 5. Зависимость выхода фракции  $1,2 \div 0,63$  мм мергеля со средним размером исходных кусков  $d_{cp}=40$  мм от величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура и высоты слоя материала в барабане; диаметр выпускных отверстий в барабане  $d_{вып}=5,0$  мм красная линия –  $H_{сл}=260$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

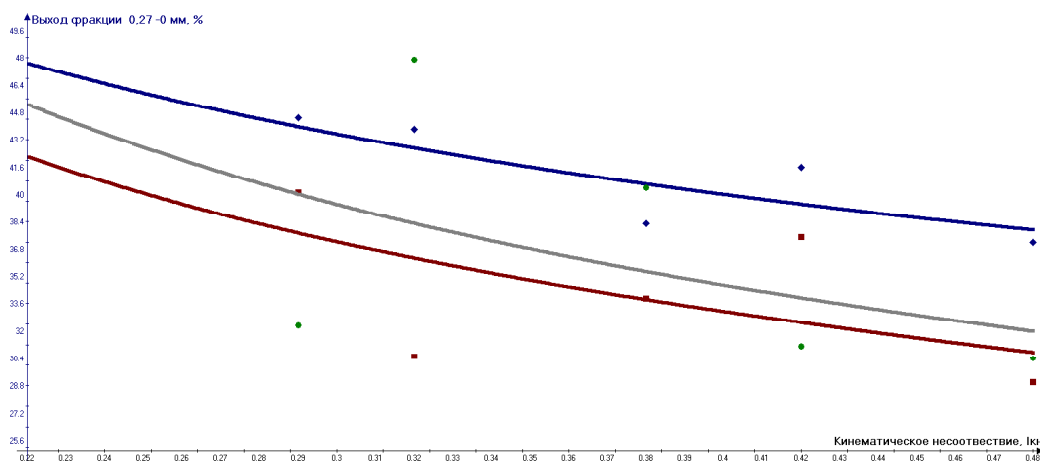


Рис. 6. Зависимость выхода фракции  $0,27 \pm 0$  мм от величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура и высоты слоя материала в барабане; диаметр выпускных отверстий в барабане  $d_{\text{вып}} = 5,0$  мм  
красная линия –  $H_{\text{сл}} = 260$  мм; синяя линия –  $H_{\text{сл}}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

Поэтому, когда угловая скорость ротора (частота) начинает превышать угловую скорость барабана на величину  $\Delta n = (n_{\text{рот}} - n_{\text{бар}}) > 400$  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 совращения 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, 6) характерно то, что образовавшиеся частицы после предыдущих процессов будут преобладать в общем объеме 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 объему выхода самых мелких фракций. При возрастании величины кинематического несоответствия, которая происходит за счет 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  $5 \pm 3$  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 переходной 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. Клыкков 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