

DOI: 10.34031/article_5ca1f635ef2844.35993706

^{1,*}Остановский А.А.¹ООО «Оптимастрой»

Россия, 141130, г. Руза, Московской области, ул. Школьная, д. 28

*E-mail: ostanovskiy51@mail.ru

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКОГО НЕСООТВЕТСТВИЯ ВЕТВЕЙ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА НА УДЕЛЬНУЮ ЭНЕРГОЁМКОСТЬ В МЕЛЬНИЦЕ СИСТЕМЫ «МКАД»

Аннотация. Обосновывается необходимость совершенствования технологических операций при переработке минерального сырья и использования для реализации этой задачи энергоэффективного измельчительного оборудования. Приводятся технические и технологические преимущества вертикальных мельниц динамического самоизмельчения, в основе которых заложен способ самоизмельчения материала, позволяющий добиться при использовании этого прогрессивного способа и машин, разработанных на его основе, снижения удельных энергозатрат. Разъясняются технические преимущества мельниц системы «МКАД», структурные схемы которых имеет индифферентную группу. Так как в мельницах этой системы для разрушения кусков и частиц дополнительно используется так называемая «циркулирующая» энергия, зависящая от степени деформации вала приводного двигателя, обосновывается необходимость исследования влияния кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура на удельные энергозатраты измельчения. Представлены графические зависимости влияния кинематического несоответствия на удельные энергозатраты измельчения в мельницах системы «МКАД».

Ключевые слова: мельница, энергоэффективность, удельные энергозатраты, структурная схема, индифферентные группы, замкнутый контур, кинематическое несоответствие, кинетическая энергия, потенциальная энергия, циркулирующая энергия.

При переработке минерального сырья основной технологической операцией является механическое разрушение исходных материалов с целью сокращения их размеров и разделения его на составные части. Такой способ получения готового продукта применяется во многих отраслях народного хозяйства и является одной из важнейших операций в технологии подготовки минерального сырья к дальнейшей переработке. При ежегодном объёме переработки минерального сырья (свыше 3 млрд. т.) общие затраты электроэнергии составляют 60 млрд. кВт·ч или до 4 % общего производства в России и странах Евразийского союза [1]. Поэтому задача по снижению энергопотребления всегда будет важнейшим направлением поиска технических решений по созданию энергоэффективного измельчительного оборудования для всех отраслей промышленности.

Основными подготовительными операциями для получения готового продукта при переработке минерального сырья являются операции дробления и измельчения. Эти операции весьма энергоёмки и металлоёмки, а энергозатраты на осуществление этих процессов достигают 70–80 % от подводимой энергии [2]. Кроме того, качество произведённого продукта, полученного после переработки этого сырья, во многом определяет тонина помола, что приводит к росту удельной энергоёмкости измельчения [3].

Существующий парк на действующих предприятиях измельчительных машин морально и физически устарел и не может в полной мере удовлетворить современные требования при производстве различных продуктов и не позволяет добиться заметного снижения удельных энергозатрат, что снижает конкурентоспособность используемых измельчительных машин на мировом рынке [4].

К основным недостаткам используемого измельчительного оборудования для переработки строительных материалов по-прежнему являются низкая производительность, высокие удельные энергозатраты и большая стоимость, высокая металлоёмкость, капитальные и эксплуатационные затраты и низкая надёжность [5–7]. Вместе с тем, отсутствие в различных отраслях промышленности, в том числе и отраслях по производству строительных материалов, высокопроизводительного и энергоэффективного измельчительного оборудования не позволяет в полной мере добиться поставленной цели, так как на существующих предприятиях преобладают морально и физически устаревшие измельчительные машины, конструкции которых разработаны ещё в 70–80 -х годах прошлого столетия. Соответственно применяемые технологии переработки их соответствуют уровню 70-х годов прошлого века и ориентированы на выпуск, как правило, узкого ассортимента продукции и

сравнительно низкого качества. Это обстоятельство выдвигает задачу перед наукой и производством по внедрению в отрасли по производству строительных материалов передовых технологий и машин мирового уровня (рис. 1).

На рис. 1 представлены задачи отраслевой науки, которые она должна решить в области создания современных технологий и оборудования, обеспечивающих повышения эффективности, при производстве строительных материалов исходя из стратегии развития строительной отрасли на ближайший период её развития.



Рис. 1 Стратегия развития строительной отрасли до 2020 года (Приказ Минрегионразвития РФ от 30.05. 2011 №262)

К наиболее перспективным измельчительным машинам, которые могут решить существующую проблему совершенствования используемого для этого оборудования, в настоящее время являются вертикальные мельницы динамического самоизмельчения системы «МАЯ», в основе которых заложен способ самоизмельчения [8–12]. Их использование позволяет добиться следующих технических преимуществ в сравнении с существующими типами мельниц:

- из процесса помола выведены мелющие тела, что позволяет выполнять футеровку менее металлоёмкой;
- появляется возможность сократить стадии дробления;
- снижается загрязнение готового продукта частицами изнашиваемого металла;

- снижение металлоёмкости позволяет снизить нагрузку на приводные элементы и увеличить надёжность машин, а также снизить мощность привода.

Однако, созданные и находящиеся в эксплуатации мельницы динамического самоизмельчения различного конструктивного исполнения, достигли предельных значений по производительности и оптимальности энергозатрат. Это объясняется тем, что в основе конструкций существующих мельниц динамического самоизмельчения используется кинетическая энергия вращающегося ротора, зависящая в основном от его скорости вращения, которая не может превышать некоторого критического значения, и увеличение которой обуславливает рост энергопотребления и эксплуатационных затрат [13].

Альтернативой мельницам этой системы являются мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД», отличительной особенностью которых является наличие в их структуре схеме индифферентных групп, что способствует снижению энергозатрат из-за возникновения так называемой «циркулирующей» энергии, которая приводит к дополнительному силовому взаимодействию кусков измельчаемого материала [14–18].

Так как удельные энергозатраты являются важнейшим критерием эффективности процесса измельчения и технических характеристик используемого для этих целей оборудования, то для вертикальных мельниц динамического самоизмельчения системы «МКАД», которые являются альтернативой мельницам системы «МАЯ», то для доказательства их технического

преимущества по удельным энергозатратам проведено сравнение этого показателя на основании экспериментальных исследований.

Согласно результатам экспериментальных исследований на основе полно факторного эксперимента, проведённых на опытном образце мельницы с индифферентной структурной группой, были получены результаты зависимости производительности и энергозатрат за период измельчения, представленных в табл. 1- 5 для мельниц обеих систем.

В табл. 1 представлены результаты экспериментальных исследований производительности по общему выходу классов и удельных энергозатрат в зависимости от входящих параметров X_1 , X_2 и X_3 для 23-х опытов согласно матрице рототабельного центрального композиционного плана для мельницы системы «МАЯ» [19].

Таблица 1

Производительность мельницы системы «МАЯ» согласно полнофакторного эксперимента

№ опыта	Матрица планирования			Производительность по общему выходу классов $Y_{1(МАЯ)}$	
	X_1	X_2	X_3	Минутная	Часовая
	Частота вращения ротора $n_{рот}$, об/мин (разность между частотами вращения ротора и цилиндрического корпуса)	Высота засыпки барабана исходным материалом ($H_{сл}$), мм	Диаметр выпускных отверстий в барабане ($d_{вып}$), мм	$G_{вых(мин)}$ кг/мин	$G_{вых(час)}$ т/час
1	329	500	9,0	0,502	0,0301
2	329	500	5,0	0,333	0,02
3	380,4	260	9,0	0,368	0,0221
4	380,4	260	5,0	0,242	0,0145
5	431,2	500	9,0	0,487	0,028
6	431,2	500	5,0	0,383	0,017
7	431,2	260	9,0	0,35	0,021
8	431,2	260	5,0	14,6	0,0146
9	582,8	380	7,0	0,717	0,043
10	481,9	380	3,4	0,243	0,0146
11	481,9	178	7,0	0,235	0,0141
12	329,7	380	7,0	0,548	0,0329
13	481,9	380	10,4	0,517	0,031
14	481,9	581,2	7,0	0,483	0,029
15	481,9	380	7,0	0,558	0,0335
16	481,9	380	9,0	0,61	0,0366
17	481,9	500	7,0	0,615	0,0369
18	380,4	500	7,0	0,553	0,0332
19	380,4	380	9,0	0,468	0,0281
20	481,9	260	7,0	0,388	0,0233
21	481,9	380	5,0	0,315	0,0189
22	431,2	380	5,0	0,252	0,0151
23	431,2	260	7,0	0,372	0,0223

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

X_1 – разность между частотами вращения ротора и цилиндрического корпуса;

X_2 – высота засыпки исходного материала в барабан, мм;

X_3 – диаметр выпускных отверстий в барабане, мм;

Y_i – производительность по общему выходу классов измельчённого материала в i -м опыте (кг/мин; т/ч).

На основе экспериментальных исследований получены с помощью измерительного комплекса

[20] и разработанной программы [21] запись изменения мощности, потребляемой из сети мельницы системы «МАЯ» - $N_{сети(МАЯ)}$, за период измельчения материала.

На рис. 2 представлен график записи этой мощности из опыта №1 полнофакторного эксперимента.

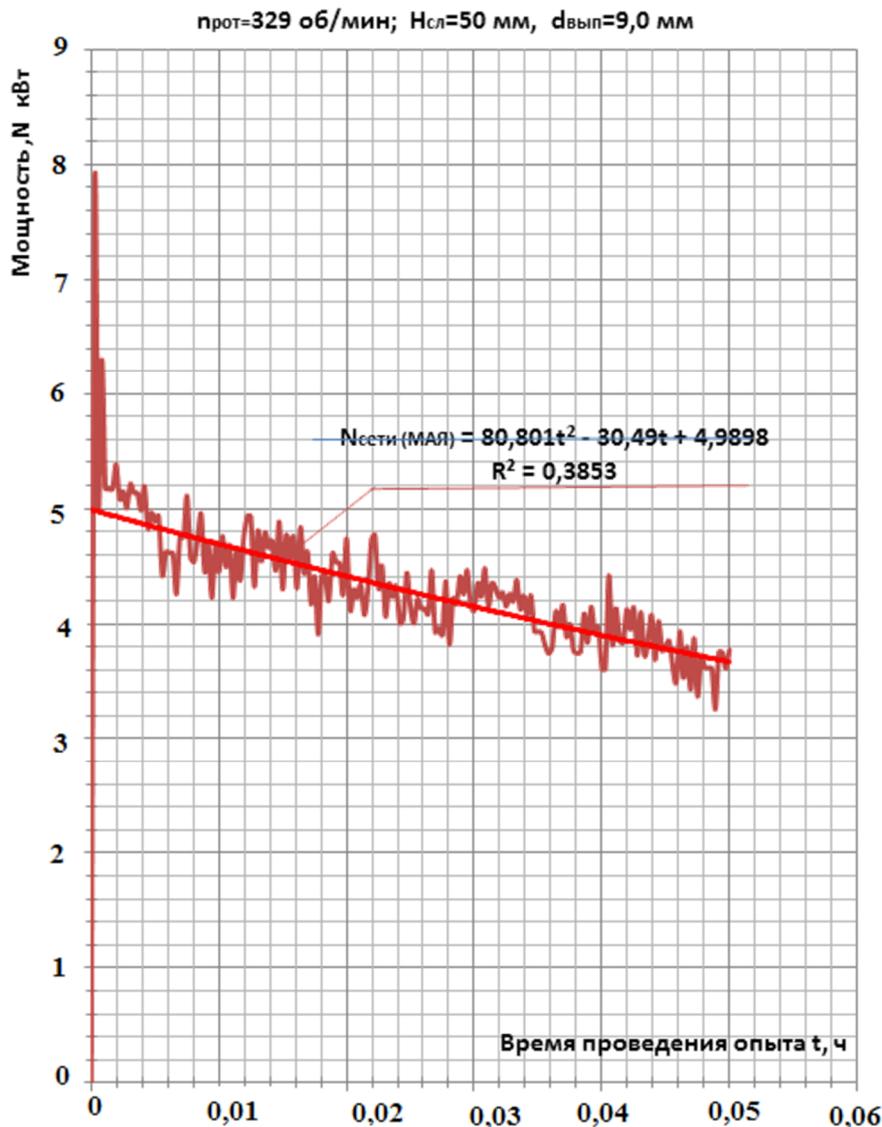


Рис. 2. График изменения мощности, потребляемой из сети, при измельчении мергеля в мельнице системы «МАЯ» из опыта №1 полнофакторного эксперимента

Вычисление энергозатрат производилось путём интегрирования полученной в результате измерения мощности потребляемой из сети, как $N_{сети} = f(I_{кн})$:

$$E_{сети i} = \int_0^{t_i} F(N_{сети i}) \cdot dt_i, \quad (1)$$

Удельные энергозатраты измельчения в i -ом опыте вычислялись как

$$E_{уд i} = \frac{E_{сети i}}{G_{вых i}}, \quad (2)$$

где $E_{сети}$ – энергия, потреблённая из сети за период измельчения t_i в i -м опыте, кВт·ч; $G_{вых i}$ – производительность мельницы в i -м опыте, т/ч.

На основе вычисления энергопотребления за период измельчения мергеля и производительности за этот же период были получены следующие результаты энергопотребления для каждого опыта этого эксперимента (табл. 2).

Таблица 2

Результаты вычисления энергозатрат в мельнице системы «МАЯ»

№ опыта	Матрица планирования			Энергозатраты за период измельчения E_i (МАЯ), кВт·ч
	X1	X2	X3	Y_i (МАЯ)
	Частота вращения ротора прот, об/мин (разность между частотами вращения ротора и цилиндрического корпуса)	Высота засыпки барабана исходным материалом (Нсл), мм	Диаметр выпускных отверстий в барабане (двып), мм	
1	329	500	9,0	$Y_1 = \int_0^{0,05} (80,801 \cdot t^2 - 30,49 \cdot t + 4,9898) dt = 0,215$
2	329	500	5,0	$Y_2 = \int_0^{0,05} (1103,9 \cdot t^2 - 111,69 \cdot t + 5,4972) dt = 0,181$
3	329	260	9,0	$Y_3 = \int_0^{0,05} (5217 \cdot t^2 - 50,235 \cdot t + 3,215) dt = 0,12$
4	329	260	5,0	$Y_4 = \int_0^{0,05} (5229 \cdot t^2 - 50,178 \cdot t + 3,335) dt = 0,122$
5	431,2	500	9,0	$Y_5 = \int_0^{0,05} (1272,2 \cdot t^2 - 108,93 \cdot t + 5,287) dt = 0,181$
6	431,2	500	5,0	$Y_6 = \int_0^{0,05} (641,88 \cdot t^2 - 66,554 \cdot t + 4,0047) dt = 0,144$
7	431,2	260	9,0	$Y_7 = \int_0^{0,05} (559,48 \cdot t^2 - 56,329 \cdot t + 3,1564) dt = 0,112$
8	431,2	260	5,0	$Y_8 = \int_0^{0,05} (826,1 \cdot t^2 - 80,219 \cdot t + 3,1794) dt = 0,093$
9	582,8	380	7,0	$Y_9 = \int_0^{0,05} (636,76 \cdot t^2 - 51,942 \cdot t + 5,706) dt = 0,247$
10	481,9	380	3,4	$Y_{10} = \int_0^{0,05} (999,39 \cdot t^2 - 96,257 \cdot t + 5,2979) dt = 0,186$
11	329,7	178	7,0	$Y_{11} = \int_0^{0,05} (10936 \cdot t^2 - 96,321 \cdot t + 3,4825) dt = 0,099$
12	481,9	380	7,0	$Y_{12} = \int_0^{0,05} (-7799 \cdot t^2 + 4,152 \cdot t + 4,801) dt = 0,213$
13	481,9	380	10,4	$Y_{13} = \int_0^{0,05} (7,5085 \cdot t^2 - 32,83 \cdot t + 5,0195) dt = 0,21$
14	481,9	581,2	7,0	$Y_{14} = \int_0^{0,05} (17823 \cdot t^2 - 45,362 \cdot t + 6,1419) dt = 0,258$
15	481,9	380	7,0	$Y_{15} = \int_0^{0,05} (33766 \cdot t^2 - 50,423 \cdot t + 5,473) dt = 0,224$
16	481,9	380	9,0	$Y_{16} = \int_0^{0,05} (13818 \cdot t^2 - 11,049 \cdot t + 5,8338) dt = 0,211$
17	380,4	500	7,0	$Y_{17} = \int_0^{0,05} (1539 \cdot t^2 - 10,027 \cdot t + 6,2286) dt = 0,25$
18	380,4	500	7,0	$Y_{18} = \int_0^{0,05} (49495 \cdot t^2 - 49,778 \cdot t + 5,4249) dt = 0,23$
19	481,9	380	9,0	$Y_{19} = \int_0^{0,05} (-37,203 \cdot t^2 - 39,592 \cdot t + 4,4234) dt = 0,17$
20	481,9	260	7,0	$Y_{20} = \int_0^{0,05} (936,31 \cdot t^2 - 81,337 \cdot t + 4,4933) dt = 0,187$
21	431,2	380	5,0	$Y_{21} = \int_0^{0,05} (645,69 \cdot t^2 - 57,97 \cdot t + 4,4032) dt = 0,175$
22	431,2	380	5,0	$Y_{22} = \int_0^{0,05} (1508,2 \cdot t^2 - 110,17 \cdot t + 3,6613) dt = 0,108$

23	481,9	260	7,0	$Y_{23} = \int_0^{0,05} (28949 \cdot t^2 - 34995 \cdot t + 3,5366) dt = 0,145$
----	-------	-----	-----	--

Произведённые вычисления позволили про- извести определить удельные энергозатраты в каждом из 23-х опытов для мельницы системы «МАЯ» (табл. 3).

Таблица 3

Результаты вычисления удельных энергозатрат для мельницы системы «МАЯ»

№ опыта	Матрица планирования			Параметры		
				Производительность в опыте $G_{\text{вых}}, \text{T}$	Энергозатраты за период измельчения в опыте $E_i, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	Удельные энергозатраты в опыте $E_{\text{уд}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}/$
	X_1	X_2	X_3	-	-	-
1	329	500	9,0	0,0301	0,215	0,215/0,0301= 7,14
2	329	500	5,0	0,02	0,181	0,181/0,02= 9,05
3	380,4	260	9,0	0,0221	0,12	0,12/0,0221= 5,42
4	380,4	260	5,0	0,0145	0,122	0,122/0,0145= 8,41
5	431,2	500	9,0	0,028	0,181	0,181/0,028= 6,46
6	431,2	500	5,0	0,017	0,144	0,144/0,017= 8,47
7	431,2	260	9,0	0,021	0,112	0,112/0,021= 5,33
8	431,2	260	5,0	0,0146	0,094	0,094/0,0146= 6,48
9	582,8	380	7,0	0,043	0,247	0,247/0,043= 5,74
10	481,9	380	3,4	0,0146	0,186	0,186/0,0146= 12,7
11	481,9	178	7,0	0,0141	0,099	0,099/0,0147= 7,02
12	329,7	380	7,0	0,0329	0,213	0,213/0,0339= 6,47
13	481,9	380	10,4	0,031	0,21	0,21/0,031= 6,78
14	481,9	581,2	7,0	0,029	0,258	0,258/0,029= 8,90
15	481,9	380	7,0	0,0335	0,225	0,225/0,0335= 6,71
16	481,9	380	9,0	0,0366	0,211	0,211/0,0366= 5,77
17	481,9	500	7,0	0,0369	0,25	0,25/0,0369= 6,77
18	380,4	500	7,0	0,0332	0,23	0,23/0,0332= 6,92
19	380,4	380	9,0	0,0281	0,17	0,17/0,0281= 6,05
20	481,9	260	7,0	0,0233	0,187	0,187/0,0233= 8,03
21	481,9	380	5,0	0,0189	0,175	0,175/0,0189= 9,23
22	431,2	380	5,0	0,0151	0,108	0,108/0,0151= 7,15

23	431,2	260	7,0	0,0223	0,145	0,145/0,0223=6,50
----	-------	-----	-----	--------	-------	-------------------

Аналогично предыдущему случаю для мельницы с индифферентной структурной группой

пой системы «МКАД» определены производительность и энергозатраты при измельчении материала, по которым определены удельные энергозатраты (табл. 4, 5 и 6).

Таблица 4

Производительность мельницы системы с индифферентной структурной группой системы «МКАД» согласно полнофакторного эксперимента

№ опыта	Матрица планирования			Производительность по общему выходу классов $Y_{1(МКАД)}$	
	X_1	X_2	X_3	Минутная	Часовая
	Кинематическое несоответствие ветвей замкнутого контура ($I_{кн}$)	Высота за-сыпки материала в барабане $H_{сл}$, мм	Диаметр выпускных отверстий в барабане ($d_{вып}$), мм	$G_{вых(мин)}$ кг/мин	$G_{вых(час)}$ т/час
1	0,42	500	9,0	0,488	0,0293
2	0,42	500	5,0	0,323	0,0194
3	0,42	260	9,0	0,338	0,0203
4	0,42	260	5,0	0,23	0,0138
5	0,32	500	9,0	0,483	0,029
6	0,32	500	5,0	0,233	0,014
7	0,32	260	9,0	0,30	0,018
8	0,32	260	5,0	0,237	0,0142
9	0,22	380	7,0	0,65	0,039
10	0,38	380	3,4	0,227	0,0136
11	0,38	178	7,0	0,24	0,0144
12	0,48	380	7,0	0,553	0,0332
13	0,38	380	10,4	0,487	0,0292
14	0,38	581,2	7,0	0,525	0,0315
15	0,38	380	7,0	0,603	0,0362
16	0,38	380	9,0	0,648	0,0389
17	0,38	500	7,0	0,61	0,0363
18	0,42	500	7,0	0,538	0,0323
19	0,42	380	9,0	0,473	0,0284
20	0,38	260	7,0	0,375	0,0225
21	0,38	380	5,0	0,302	0,0181

22	0,32	380	5,0	0,217	0,0130
23	0,32	260	7,0	0,585	0,0351

В табл. 4 приняты следующие обозначения:

X_1 – величина кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура, определяемая как $i_{\text{верх}}/i_{\text{нижн}}$; $i_{\text{верх}}$ – передаточное отношение кинематической передачи в верхней ветви замкнутого контура; $i_{\text{нижн}}$ – передаточное отношение кинематической передачи в нижней ветви замкнутого контура;

X_2 – высота засыпки исходного материала в барабан, мм;

X_3 – диаметр выпускных отверстий в барабане, мм;

Y_i – производительность по общему выходу классов измельченного материала в i -м опыте (кг/мин; т/ч).

Производительность мельницы системы «МКАД» по 23 опытам полнофакторного эксперимента представлена в табл. 5

Таблица 5

Производительность мельницы системы с индифферентной структурной группой системы «МКАД» согласно полнофакторного эксперимента

№ опыта	Матрица планирования			Производительность по общему выходу классов $Y_{1(\text{МКАД})}$	
	X_1	X_2	X_3	Минутная	Часовая
	Кинематическое несоответствие ветвей замкнутого контура ($I_{\text{кн}}$)	Высота засыпки барабана исходным материалом ($H_{\text{сл}}$), мм	Диаметр выпускных отверстий в барабане ($d_{\text{вып}}$), мм	$G_{\text{вых (мин)}}$ кг/мин	$G_{\text{вых (час)}}$ т/час
1	0,42	500	9,0	0,488	0,0293
2	0,42	500	5,0	0,323	0,0194
3	0,42	260	9,0	0,338	0,0203
4	0,42	260	5,0	0,23	0,0138
5	0,32	500	9,0	0,483	0,029
6	0,32	500	5,0	0,233	0,014
7	0,32	260	9,0	0,30	0,018
8	0,32	260	5,0	0,237	0,0142
9	0,22	380	7,0	0,65	0,039
10	0,38	380	3,4	0,227	0,0136
11	0,38	178	7,0	0,24	0,0144
12	0,48	380	7,0	0,553	0,0332
13	0,38	380	10,4	0,487	0,0292
14	0,38	581,2	7,0	0,525	0,0315
15	0,38	380	7,0	0,603	0,0362
16	0,38	380	9,0	0,648	0,0389
17	0,38	500	7,0	0,61	0,0363
18	0,42	500	7,0	0,538	0,0323
19	0,42	380	9,0	0,473	0,0284
20	0,38	260	7,0	0,375	0,0225
21	0,38	380	5,0	0,302	0,0181
22	0,32	380	5,0	0,217	0,0130
23	0,32	260	7,0	0,585	0,0351

На рис. 3 представлена запись изменения мощности, потребляемой из сети при имитации мельницы системы «МАЯ» и мельницы системы «МКАД» в опыте №1 полнофакторного эксперимента.

На основе вычисления энергопотребления за период измельчения мергеля и производительности за этот же период были получены следующие результаты энергопотребления для каждого опыта этого эксперимента (табл. 6).

На основе полученных данных производительности и энергозатрат в каждом из 23-х опытов полнофакторного эксперимента произведены вычисления удельных энергозатрат в каждом из этих опытах (табл. 7).

Анализ полученных результатов удельных энергозатрат для мельниц систем «МАЯ» и «МКАД» показывает, что энергоэффективность мельницы системы «МКАД» в сравнении с прототипом. При этом максимальное снижение удельных затрат составило: для опыта №15 - при влияющих факторах $-I_{кн}=0,38$; $H_{сл}=380$ мм; $d_{вып}=7,0$ мм $E_{уд(МКАД)}=4,14$ кВт·ч/т и $E_{уд(МАЯ)}=6,17$ кВт·ч/т, что соответствует снижению на 32,9%. Минимальное снижение удельных энергозатрат для мельниц двух систем составило в опыте №6 - при влияющих факторах $-I_{кн}=0,32$; $H_{сл}=500$ мм; $d_{вып}=5,0$ мм $E_{уд(МКАД)}=8,52$ кВт·ч/т и $E_{уд(МАЯ)}=8,47$ кВт·ч/т, что соответствует снижению удельных энергозатрат всего на 0,6%.

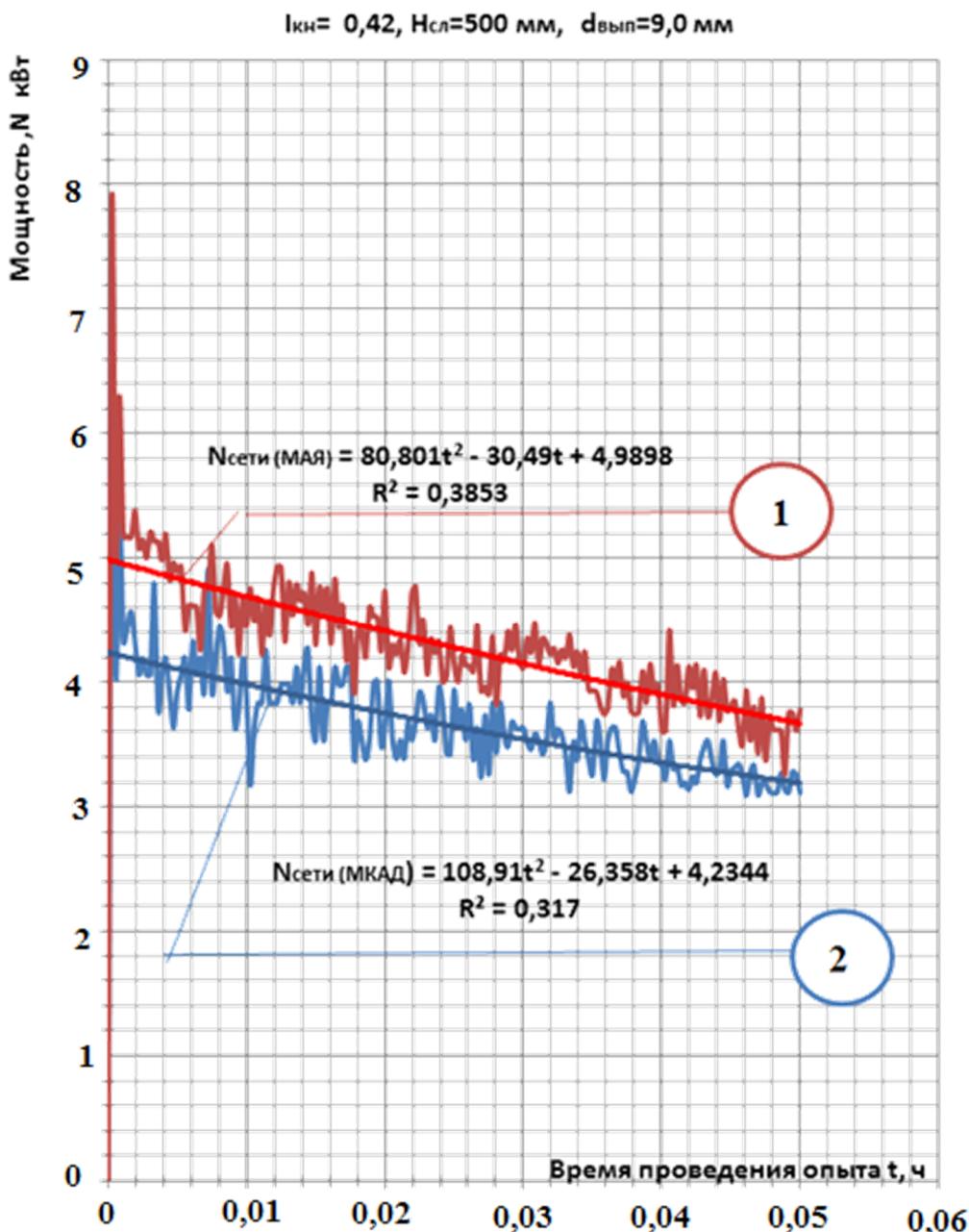


Рис. 3. Результаты измерения мощности, потребляемой из сети, в мельнице системы «МАЯ» и «МКАД» за период измельчения мергеля в опыте №1

Таблица 6

Результаты измерения энергозатрат за период измельчения в мельнице системы «МКАД»

№ опыта	Матрица планирования			Энергозатраты за период измельчения Есети (МКАД), кВт·ч
	X1	X2	X3	Yi (МКАД)
	Кинематическое несоответствие ветвей замкнутого контура (Кн)	Высота засыпки барабана исходным материалом (Нсл), мм	Диаметр выпускных отверстий в барабане (двып), мм	
1	0,42	500	9,0	$Y_1 = \int_0^{0,05} (108,911 \cdot t^2 - 26,358 \cdot t + 4,2344) dt = 0,$
2	0,42	500	5,0	$Y_2 = \int_0^{0,05} (992,28 \cdot t^2 - 95,573 \cdot t + 4,7054) dt = 0,157$
3	0,42	260	9,0	$Y_3 = \int_0^{0,05} (440,91 \cdot t^2 - 38,178 \cdot t + 2,678) dt = 0,105$
4	0,42	260	5,0	$Y_4 = \int_0^{0,05} (440,9 \cdot t^2 - 38,178 \cdot t + 2,679) dt = 0,105$
5	0,32	500	9,0	$Y_5 = \int_0^{0,05} (223,08 \cdot t^2 - 46,137 \cdot t + 2,679) dt = 0,127$
6	0,32	500	5,0	$Y_5 = \int_0^{0,05} (223,08 \cdot t^2 - 46,137 \cdot t + 2,679) dt = 0,127$
7	0,32	260	9,0	$Y_6 = \int_0^{0,05} (1278,6 \cdot t^2 - 90,663 \cdot t + 3,5841) dt = 0,119$
8	0,32	260	5,0	$Y_7 = \int_0^{0,05} (1145,3 \cdot t^2 - 75,885 \cdot t + 2,6755) dt = 0,087$
9	0,22	380	7,0	$Y_8 = \int_0^{0,05} (739,59 \cdot t^2 - 53,894 \cdot t + 2,2113) dt = 0,074$
10	0,38	380	3,4	$Y_{10} = \int_0^{0,05} (2494,2 \cdot t^2 - 187,2 \cdot t + 5,9597) dt = 0,168$
11	0,38	178	7,0	$Y_{11} = \int_0^{0,05} (999,14 \cdot t^2 - 76,19 \cdot t + 2,7255) dt = 0,083$
12	0,48	380	7,0	$Y_{12} = \int_0^{0,05} (185,78 \cdot t^2 - 31,274 \cdot t + 3,8365) dt = 0,16$
13	0,38	380	10,4	$Y_{13} = \int_0^{0,05} (-365,78 \cdot t^2 - 52,998 \cdot t + 4,8429) dt = 0,16$
14	0,38	581,2	7,0	$Y_{14} = \int_0^{0,05} (-23,934 \cdot t^2 - 36,734 \cdot t + 5,6793) dt = 0,23$
15	0,38	380	7,0	$Y_{15} = \int_0^{0,05} (-507,53 \cdot t^2 - 50,241 \cdot t + 4,6802) dt = 0,15$
16	0,38	380	9,0	$Y_{16} = \int_0^{0,05} (109,71 \cdot t^2 - 36,414 \cdot t + 4,5869) dt = 0,$
17	0,38	500	7,0	$Y_{17} = \int_0^{0,05} (564,98 \cdot t^2 - 45,38 \cdot t + 5,1306) dt = 0,22$
18	0,42	500	7,0	$Y_{18} = \int_0^{0,05} (156,87 \cdot t^2 - 23,252 \cdot t + 4,2654) dt = 0,191$
19	0,42	380	9,0	$Y_{19} = \int_0^{0,05} (677,87 \cdot t^2 - 81,414 \cdot t + 4,2266) dt = 0,13$
20	0,38	260	7,0	$Y_{20} = \int_0^{0,05} (441,26 \cdot t^2 - 56,631 \cdot t + 4,1249) dt = 0,15$
21	0,38	380	5,0	$Y_{21} = \int_0^{0,05} (15001 \cdot t^2 - 11273 \cdot t + 4,731) dt = 0,15$
22	0,32	380	5,0	$Y_{22} = \int_0^{0,05} (1869 \cdot t^2 - 120,25 \cdot t + 3,079) dt = 0,08$

23	0,32	260	7,0	$Y_{23} = \int_0^{0,05} (927,06 \cdot t^2 - 59,825 \cdot t + 2,9253) dt = 0,1$
----	------	-----	-----	--

Таблица 7

Результаты вычисления удельных энергозатрат в мельнице системы «МКАД»

№ опыта	Матрица планирования			Параметры		
				Производительность в опыте $G_{\text{вых}}, \text{Т}$	Энергозатраты за период измельчения в опыте $E_i, \text{кВт}\cdot\text{ч}$	Удельные энергозатраты в опыте $E_{\text{уд}}, \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$
-	X_1	X_2	X_3	-	-	-
1	0,42	500	9,0	0,0293	0,183	0,183/0,0293=6,25
2	0,42	500	5,0	0,0194	0,157	0,157/0,0194=8,1
3	0,42	260	9,0	0,0203	0,105	0,105/0,0203=5,17
4	0,42	260	5,0	0,0138	0,107	0,107/0,0138=7,75
5	0,32	500	9,0	0,029	0,127	0,127/0,029=4,38
6	0,32	500	5,0	0,014	0,119	0,119/0,014=8,52
7	0,32	260	9,0	0,018	0,087	0,087/0,018=4,83
8	0,32	260	5,0	0,0142	0,074	0,074/0,0142=5,21
9	0,22	380	7,0	0,039	0,223	0,223/0,039=5,71
10	0,38	380	3,4	0,0136	0,168	0,168/0,0136=12,4
11	0,38	178	7,0	0,0144	0,083	0,083/0,0144=5,77
12	0,48	380	7,0	0,0332	0,16	0,16/0,0332=4,82
13	0,38	380	10,4	0,029	0,161	0,161/0,029=5,52
14	0,38	581,2	7,0	0,0315	0,237	0,237/0,0315=7,52
15	0,38	380	7,0	0,0362	0,15	0,15/0,0362=4,14
16	0,38	380	9,0	0,0389	0,188	0,188/0,0389=4,83
17	0,38	500	7,0	0,0363	0,223	0,223/0,0363=6,14
18	0,42	500	7,0	0,0323	0,191	0,191/0,0323=5,91
19	0,42	380	9,0	0,0283	0,138	0,138/0,0283=4,89
20	0,38	260	7,0	0,0224	0,154	0,154/0,0224=6,88
21	0,38	380	5,0	0,0181	0,158	0,158/0,0181=8,73
22	0,32	380	5,0	0,0130	0,082	0,082/0,0130=6,31
23	0,32	260	7,0	0,0351	0,185	0,185/0,0351=5,27

Полученные результаты и зависимость удельных энергозатрат от кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура являются ориентиром для выбора оптимальных конструктивных и режимных параметров вертикальной мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД» при их проектировании, обеспечивающие минимальные удельные энергозатраты при измельчении принятого для исследования материала.

На основе полученных результатов построены графики зависимости удельных энергозатрат от величины кинематического несоответствия

ветвей замкнутого контура. В табл. 8 представлены исходные данные для построения графика удельных энергозатрат в зависимости от кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура, а на рис. 4 построены эти зависимости при заданных параметрах – высоте засыпки $H_{\text{сл}}=380$ мм и диаметре выпускных отверстий в барабане $d_{\text{вып}}=7,0$ мм для мельницы системы «МКАД».

Исходные данные для построения графиков, принятые из полнофакторного эксперимента, представлены в табл. 8.

Таблица 8

Исходные данные для построения графика удельных энергозатрат в зависимости от кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура

№п/п	Кинематическое несоответствие $I_{\text{кн}}$	Высота засыпки исходного материала в барабан, $H_{\text{сл}}, \text{мм}$	Диаметр выпускных отверстий в барабане $d_{\text{вып}}, \text{мм}$	Удельные энергозатраты $E_{\text{уд}}(\text{МКАД}), \text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}$
------	---	--	--	---

1	0,22	380	7,0	5,71
2	0,38	380	7,0	4,14
3	0,42	380	7,0	5,52
4	0,48	380	7,0	4,89

Построение графика зависимости удельных энергозатрат в зависимости от кинематического

несоответствия ветвей замкнутого контура мельницы системы «МКАД» производилось с помощью программы «AdvancedGrapher».

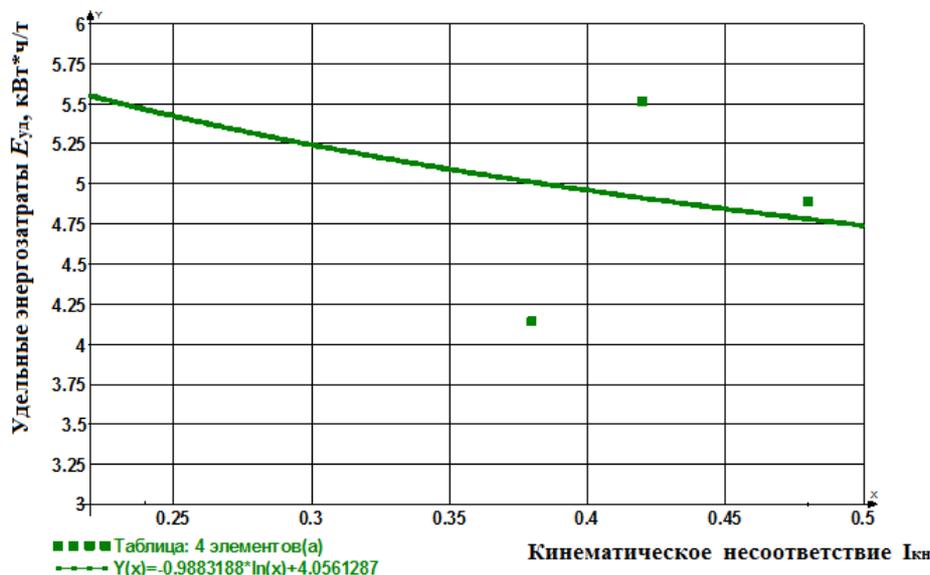


Рис. 4. График зависимости удельных энергозатрат измельчения от кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура в мельнице системы «МКАД»

Анализ полученной зависимости экспериментально подтверждает дополнительного влияния силовой составляющей процесса измельчения в мельнице данной системы, возникающей «циркулирующей» энергии в замкнутом контуре при передаче по её ветвям разных по величине потоков мощности к столбу измельчаемого материала [22]. Так как с увеличением величины кинематического несоответствия вал электродвигателя будет деформироваться (скручиваться) на большую величину относительно первоначального состояния, то и потенциальная энергия в нём будет расти, а удельные энергозатраты будут снижаться, что наблюдается на графике (рис. 3).

Аналогично рассмотренному выше графику будет изменяться удельная энергоёмкость в зависимости от других сочетаний влияющих параметров процесса.

Выводы. Полученные экспериментальным путём данные зависимости удельных энергозатрат в зависимости от величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура для мельницы с индифферентной структурной группой системы «МКАД»:

1) экспериментом подтвердить возможность полезного использования так называемой «циркулирующей» энергии для дополнительного силового воздействия на измельчаемый материал за равный период измельчения, что обеспечивает

снижение энергозатрат в сравнении с мельницей системы «МАЯ»;

2) получить более низкие удельные энергозатраты на измельчение материала, достигающие 32,6 % при измельчении мергеля с исходной крупностью $D_{исх}=30$ мм;

3) путём изменения величины кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура регулировать производительность и энергозатраты, обеспечивая получение готового продукта измельчения с требуемыми характеристиками;

4) построить зависимости удельных энергозатрат в зависимости от кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура, что позволит при проектировании и эксплуатации мельниц этой системы устанавливать оптимальные режимные и конструктивные параметры, обеспечивающие значительное снижение энергопотребления и удельных энергозатрат измельчения материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хетагуров В.Н. Разработка и проектирование центробежных мельниц вертикального типа. Владикавказ: Терек, 1999. 225 с.
2. Гегелашвили М. В. Теория и практика мельниц динамического самоизмельчения. Владикавказ: Терек, 2001. с. 208.

3. Егоров И.Н. К вопросу об интенсификации помола в бильной мельнице // Сб. трудов международного научного симпозиума – машиностроителей и механиков. 2014. С. 189–193.
4. Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И., Пилов В.И. Измельчение. Энергетика и технология. М.: Издательский дом «Руда и Металлы». 2007. 296 с.
5. Субботин М. Ф. Анализ современного состояния и перспективы развития дробильно-измельчительного оборудования // Вестник Читинского гос ун-та (Вестник ЧитГУ). Чита: ЧитГУ, 2010. (№3(5)). С. 100–105.
6. Ревнивцев В.И., Капралов Е.Л., Костин И.М. и др. В кн.: Совершенствование процессов дробления, измельчения, грохочения и классификации руд и продуктов обогащения. Л., Механобр, 1985.
7. Технология сырья на перепутье. Проблемы и перспективы. Пер. с англ./Под ред. Б. А. Уилса, Р. В. Барея. М.: Недра, 1992. 272 с.
8. Дровников А.Н., Остановский А.А. Создание измельчителя динамического самоизмельчения // Инженерный вестник Дона. Номер. 2012. С. 5–6.
9. Дровников А.Н., Остановский А.А., Никитин Е.В., Павлов И.А., Осипенко Л.А., Агафонов Н.А. Измельчитель динамического самоизмельчения Пат. на изобретение №2465960 РФ, 5 с.
10. Дровников А.Н., Остановский А.А., Маслов Е.В., Бурков Н.В., Романенко Г.Н. Мельница. Пат. на изобретение № 2496581 Российская Федерация. 5 с.
11. 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: Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса (ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС»), опубл. 20.06.2014 г., Бюл. №17. 4 с.
12. Дровников А.Н., Остановский А. А., Бурков Н. В., Маслов Е.В. Усовершенствование измельчителей динамического самоизмельчения. // Юбилейный международный сборник научных трудов, посвященный 40-летию кафедры «Машины и оборудование бытового и жилищно-бытового назначения», 2013. С. 58–61.
13. Гегелашвили М.В. Определение границ скоростных режимов движения материала в мельнице динамического самоизмельчения «МАЯ» // Механизмы и машины ударного, периодического и вибрационного действия. Матер, междунар. симп. (Орел 22- 24 нояб. 2000 г.) Орел ОПУ. 2000 С. 245–249.
14. Крайнев А.Ф. Словарь-справочник по механизмам. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1987. 560 с.
15. Никитин А.А. Явление возврата мощности через замыкающую кинематическую цепь // Тр. Днепропетровского ин-та железнодорожного тр-та, вып. 19. Днепропетровск, 1948. С. 161–239.
16. Остановский А.А., Дровников А.Н. Закономерности передачи мощности к измельчаемому материалу в мельницах системы «МКАД» // Наука и образование. 2017. №5.
17. Дровников А.Н., Остановский А.А. Системы мельниц динамического самоизмельчения контурного типа. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова. Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2017. 183 с.
18. Остановский А.А., Осипенко Л.А., Дровников А. Н., Маслов Е.В. Сравнительный анализ энергоэффективности вертикальных мельниц динамического самоизмельчения системы «МАЯ» и «МКАД» // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова, 2018. 9. С. 75–82.
19. Пат. на полезную модель №175743 РФ, МПК G01L 3/24. Стенд для измерения мощности в замкнутом контуре мельницы динамического самоизмельчения. Остановский А. А., Дровников А.Н., Рыбальченко Н.Г., Рыбальченко А.Н., Черкесова Э.Ю.; заявл. 13.12.2016, заявитель и патентообладатель Остановский А.А., опубл. 23.05.2018, Бюл. №15.
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661841 «Программа расчёта угла скручивания вала электромеханической системы стенда для измерения мощности в замкнутом контуре мельницы динамического самоизмельчения». Остановский А.А., Алехин А.С., Козырев П.П., Шейрих В.С.; заявл. 14.06.2018, заявитель и патентообладатель Донской государственный технический университет (ДГТУ); зарегистрировано 19.09.2018 года.
21. Остановский А.А. Анализ и выбор рациональной структурной схемы вертикальной мельницы динамического самоизмельчения // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2018. № 1. С. 66–73.

Информация об авторах

Остановский Александр Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент, главный инженер. E-mail: ostanovskiy51@mail.ru. ООО «Оптимастрой». Россия, 141130, г. Руза, Московской области, улица Школьная, дом 28.

Поступила в декабре 2018 г.

© Остановский А.А., 2019

^{1,*}*Ostanovskiy A.A.*

¹*LLC "Optimastroy"*

Russia, 141130 Ruza, Moscow Region, Shkolnaya St. 28

**E-mail: ostanovskiy51@mail.ru*

ANALYSIS OF THE IMPACT OF KINEMATIC INSUFFICIENCY OF BRANCHES OF A CLOSED CONTOUR REDUCED POWER INPUT IN THE MILL OF THE MKAD SYSTEM

Abstract. *The necessity of improving technological operations in the processing of mineral raw materials and the use of energy-efficient grinding equipment is substantiated. The technical and technological benefits of vertical dynamic autogenous grinding mills are given. They are based on a method of self-grinding of the material, which allows to reduce the specific energy consumption. The technical advantages of the MKAD system mills, the structural schemes of which have an indifferent group are explained. Since the mills of this system additionally use so-called "circulating" energy, depending on the degree of deformation of the drive motor shaft, it is necessary to study the effect of kinematic mismatch of closed-circuit branches on the specific energy consumption of grinding. The graphic dependences of kinematic discrepancy effect on the specific energy consumption of grinding in the MKAD system mills are presented.*

Keywords: *mill, energy efficiency, specific energy consumption, block diagram, indifferent groups, closed loop, kinematic discrepancy, kinetic energy, potential energy, circulating energy*

REFERENCES

1. Khetagurov V.N. Development and design of centrifugal mills of vertical type. Vladikavkaz: Terek, 1999. 225p.

2. Gegelashvili M.V. Theory and Practice of Dynamic Self-Grinding Mills. Vladikavkaz: Terek, 2001, p. 208.

3. Egorov I.N. On the question of the intensification of grinding in a mobile mill. Sb. labor of the international scientific symposium - machine builders and mechanics, 2014, p. 189–193.

4. Pivnyak G.G., Weisberg L.A., Kirichenko V.I., Pilov V.I. Shredding. Energy and technology. M.: Publishing house "Ore and Metals", 2007, 296 p.

5. Subbotin M.F. Analysis of the current state and development prospects of crushing and grinding equipment. West of the Chita State University (Vestnik ChitSU). Chita: ChitSU, 2010. (no. 3 (5)), Pp. 100–105.

6. Revnitshev V.I., Kapralov E.L., Kostin I.M. and others. In the book: Improving the processes of crushing, grinding, screening and classification of ores and enrichment products. L., Mekhanobr, 1985.

7. Technology of raw materials at a crossroads. Problems and prospects. Per. from English. Ed. B.A. Wils, R.V. Bareya. M.: Nedra, 1992, 272 p.

8. Drovnikov A.N., Ostanovskiy A.A. Creation of a shredder for dynamic self-grinding. // Engineering Bulletin of the Don. Room, 2012, p. 5–6.

9. Drovnikov A.N., Ostanovskiy A.A., Nikitin E.V., Pavlov I.A., Osipenko L.A., Agafonov N.A.

The Grinder of Dynamic Self-Grinding Pat. the invention no. 2465960 of the Russian Federation, 5 p.

10. Drovnikov A.N., Ostanovskiy A.A., Maslov E.V., Burkov N.V., Romanenko G.N. Mill. Pat for invention no. 2496581 Russian Federation. 5 p.

11. Pat. for invention №2520008 Russian Federation. IPC B02C13 / 14. From the grinder of the dynamic self-grinding of the material / Drovnikov A.N., Ostanovskiy A.A., Maslov E.V., Rybalchenko A.N.; 2013105689/13; declare 11.02. 2013; Patent holder: South-Russian State University of Economics and Service (FSBEI HPO "YURGUES"), publ. 20.06 2014, Byul. no. 17. 4 p.

12. Drovnikov A.N., Ostanovskiy A.A., Burkov N.V., Maslov E.V. Improvement of dynamic self-grinding shredders. The jubilee international collection of scientific papers dedicated to the 40th anniversary of the department "Machines and equipment for household and residential purposes? 2013, pp. 58–61.

13. Gegelashvili M.V. Determination of the boundaries of high-speed modes of movement of the material in the MAY dynamic self-grinding mill // Mechanisms and machines of percussion, periodic and vibrational action. Mater, mezhdynar. simp (Eagle, 22–24 Nov. 2000). Eagle OPU. 2000 pp. 245–249.

14. Kraynev A.F. Dictionary-reference mechanisms. 2nd ed., Pererab. and add. M.: Mashinostroenie, 1987, 560 p.

15. Nikitin A.A. The phenomenon of the return of power through the closing kinematic chain. Tr. Dnepropetrovsk Institute of Railroad Tr-ta, vol. 19,

Dnipropetrovsk, 1948, pp. 161–239.

16. Ostanovskiy A.A., Drovnikov A.N. Patterns of power transmission to grindable material in the mills of the MKAD system. Science and Education. 2017, no. 5.

17. Drovnikov A.N., Ostanovskiy A.A. Systems of mills of dynamic self-milling of contour type. South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after MI Plateau-va. Novocherkassk: YuPGPU (NPI), 2017, 183 p.

18. Ostanovskiy A.A., Osipenko L.A., Drovnikov A.N., Maslov E.V. Comparative analysis of the energy efficiency of vertical mills of dynamic autogenous grinding of the MAYA and MKAD system. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 9, pp. 75–82.

19. Pat. for useful model №175743 RF MPC GOIL 3/24. Stand for measuring power in a closed loop mill dynamic autogenous grinding. Stop A. A.,

Drovnikov A.N., Rybalchenko N.G., Rybalchenko A.N., Cherksova E.U.; for-yavl. 12/13/2016, applicant and patent holder Ostanovskiy AA, publ. 05.23.2018 Bul. no. 15.

20. Certificate of state registration of computer program no. 2018661841 “Program for calculating the angle of torsion of the shaft of the electromechanical system of the bench for measuring power in a closed loop of a dynamic self-grinding mill”. Ostanovskiy A.A., Alekhin A.S., Kozyrev P.P., Sherikh V.S.; declare 06/14/2018, the applicant and patentee Don State Technical University (DSTU); Registered on 19.09.2018.

21. Ostanovskiy A.A. Analysis and selection of a rational structural scheme of a vertical mill of dynamic self-grinding. News of higher educational institutions. North Caucasus region. Technical science, 2018. no. 1, pp. 66–73.

Information about the author

Ostanovsky, Alexander A. PhD, Assistant professor, chief engineer. E-mail: ostanovskiy51@mail.ru. LLC "Optimastroy", Russia, 141130 Ruza, Moscow Region, Shkolnaya St. 28

Received in Desember 2018

Для цитирования:

Остановский А.А. Анализ влияния кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура на удельную энергоёмкость в мельнице системы «МКАД» // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №3. С. 134–148. DOI: 10.34031/article_5ca1f635ef2844.35993706

For citation:

Ostanovskiy A.A. Analysis of the impact of kinematic insufficiency of branches of a closed contour reduced power input in the mill of the mkad system. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 3, pp. 134–148. DOI: 10.34031/article_5ca1f635ef2844.35993706