

DOI: 10.12737/article\_5bab4a21f1f347.49352549

<sup>1</sup>Остановский А.А., канд. техн. наук, доц., главный инженер,<sup>2</sup>Дровников А.Н., д-р техн. наук, проф.,<sup>3</sup>Осипенко Л.А., канд. техн. наук, доц.,<sup>2</sup>Маслов Е.В., аспирант<sup>1</sup>ООО «Оптимастрой», г. Руза Московской области<sup>2</sup>Южно-Российский государственный политехнический университет  
(НПИ) имени М.И. Платова<sup>3</sup>Институт Сферы обслуживания и предпринимательства  
(филиал) Донского государственного технического университета

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ МЕЛЬНИЦ ДИНАМИЧЕСКОГО САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СИСТЕМЫ «МАЯ» И «МКАД»

Обосновывается необходимость проведения серии экспериментов на физической модели мельницы системы «МАЯ» по определению энергозатрат при измельчении мергеля с исходной крупностью кусков  $d_{ср}=30$  мм. Показана процедура по преобразованию мельницы системы «МКАД» в физическую модель мельницы динамического самоизмельчения системы «МАЯ», что позволит получить сопоставимые и объективные результаты. Приводятся результаты экспериментальных исследований удельных энергозатрат мельницы систем «МАЯ» и «МКАД», полученных на опытных образцах при равных конструктивных и режимных параметрах. Построены графики зависимости энергопотребления от кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура, высоты засыпки исходного материала и диаметра выпускных отверстий в барабане мельниц сравниваемых систем. Представлены результаты удельных энергозатрат для мельниц двух систем, показывающие более высокую энергоэффективность мельницы системы «МКАД», структурная схема которой имеет индифферентную группу. Это позволяет дополнительно использовать для разрушения частиц материала потенциальную энергию от скручивания вала приводного двигателя.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, энергозатраты, удельные энергозатраты, производительность, кинематическое несоответствие, циркулирующая мощность, индифферентные структурные группы.

Одним из перспективных направлений совершенствования и развития измельчительного оборудования, использование которого позволит снизить энергозатраты, является созданный на основе разработанной классификации [1, 2] экспериментальный образец вертикальной мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД», структурная схема которой имеет индифферентную структурную группу [3]. Отличительной особенностью мельницы этой системы является наличие в её кинематической цепи замкнутого контура. Это позволяет при подводе потоков мощности от приводного двигателя по верхней и нижней ветви замкнутого контура к столбу измельчаемого материала за счёт их кинематического несоответствия использовать так называемую «циркулирующую» энергию, которая возникает при скручивании вала приводного двигателя и обеспечить дополнительное силовое воздействие на частицы измельчаемого материала [4–10].

Однако в процессе проведения эксперимента на опытном образце мельницы этой системы по ряду причин не исследовались факторы, которые

могут повлиять на выходные технические показатели по производительности и энергозатратам. К таким факторам можно отнести способ выпуска измельчённого материала через отверстия, которые выполнены в боковой поверхности барабана, а не в роторе, как это осуществляется в мельнице системы «МАЯ» или через щелевые отверстия, находящиеся между ротором и неподвижным цилиндрическим корпусом [11–13]. Кроме того, одновременное вращение барабана и ротора в одном направлении, но с разными угловыми скоростями, приводит к изменению вектора движения частиц через выпускные отверстия, что способствует несвоевременной эвакуации достигших определённых размеров частиц измельчаемого материала и его переизмельчению и росту энергозатрат [14].

Так как теоретическое исследование этого фактора для мельницы данной системы является весьма сложной задачей, то на начальном этапе целесообразным и необходимым условием для оценки энергоэффективности мельниц системы «МАЯ» и «МКАД» является экспериментальное подтверждение возможности полезного исполь-

зования «циркулирующей» энергии, обеспечивающей более высокую энергоэффективность вертикальной мельницы динамического самоизмельчения с индифферентной структурной группой.

Поэтому дополнительно проведена серия экспериментальных исследований на опытном образце, который с помощью его незначительной модернизации мельница системы «МКАД» была преобразована в мельницу системы «МАЯ», в которой цилиндрический корпус остаётся неподвижным в период измельчения. Преобразование вертикальной мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД» в мельницу системы «МАЯ» достигается отсоединением приводной цепи верхней ветви приводной 5 и ведомой 3 звёздочек и заклинивания барабана 1 с помощью стопора 4, что позволило исключить передачу крутящего момента от электродвигателя 6 к барабану 1 (рис. 1).

С помощью произведённого преобразования была получена физическая модель мельницы системы «МАЯ», в которой реализован принцип подобия процесса измельчения для мельниц двух систем [15]. Это позволило для физической модели соблюсти равными геометрические и кинематические параметры сравниваемых вариантов мельниц, что позволяет объективно оценить выходные показатели по производительности и энергозатратам.

Выполненная процедура по преобразованию мельницы системы «МКАД» и систему «МАЯ» позволяет избежать необходимости изготовления дополнительной экспериментальной установки и обеспечить при проведении опытов равенство изменяемых параметров: высоты засыпки исходного материала  $H_{сл}$  ( $X_2$ ), диаметр выпускных отверстий в барабане  $d_{вып}$  ( $X_3$ ), т. е. влияние тех параметров на энергозатраты и производительность, которые были приняты в полнофакторном эксперименте для мельницы этой системы [16]. В этом случае вместо кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура

в приведённой мельнице системы «МАЯ» частота вращения ротора устанавливалась таким образом, чтобы она была равна разности частот вращения ротора и барабана, т.е. такие режимы, которые используются в мельнице системы «МКАД» —  $n_{рот(МАЯ)} = n_{рот(МКАД)} - n_{бар(МКАД)} \approx 350 \div 400$  об/мин [17].

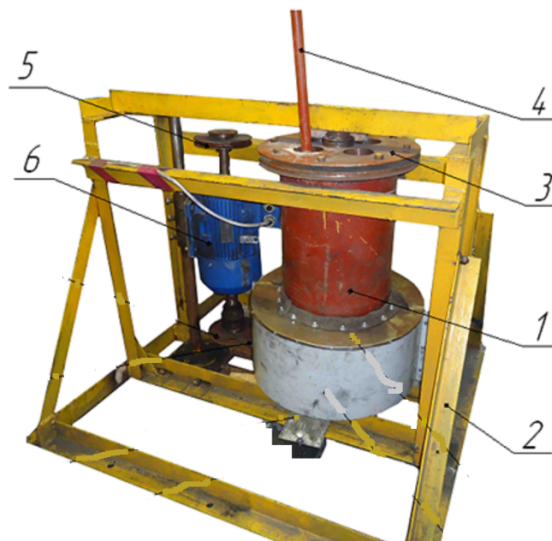


Рис. 1. Приведение мельницы системы «МКАД» к мельнице системы «МАЯ» путём отсоединения привода верхней ветви и стопорением цилиндрического барабана:

- 1 – цилиндрический застопоренный барабан;  
2 – рама; 3 – ведомый шкив привода барабана; 4 – м стопор; 5 – ведущая звёздочка привода ротора;  
6 – электродвигатель

Установление необходимой частоты вращения ротора в преобразованную мельницу системы «МАЯ» осуществлялась путём смены ведущей и ведомой звёздочки в нижней ветви.

В табл. 1 представлены некоторые конструктивные и кинематические параметры ведущей и ведомой звёздочек привода ротора, обеспечивающих сопоставимые частоты вращения ротора в мельницах системы «МКАД» по отношению к частоте вращения ротора в мельнице системы «МАЯ».

Таблица 1

#### Частота оборотов ротора в зависимости от соотношения ведущей и ведомой звёздочки привода ротора

№ п/п	Частота вращения электродвигателя $n_{дв}$ , об/мин	Число зубьев ведущей звёздочки нижней ветви, $Z_1$	Число зубьев ведомой звёздочки нижней ветви, $Z_2$	Передаточное отношение передачи, $i_{пер}$	Частота вращения ротора $n_{рот}$ , об/мин
1	1750	13	69	0,188	329,0
2	1750	15	69	0,217	379,8
3	1750	17	69	0,246	430,5
4	1750	18	69	0,261	456,8
5	1750	19	69	0,275	481,3
6	1750	23	69	0,333	582,8

Таким образом, при одинаковых значениях влияющих факторов: высоты засыпки исходного материала (мергеля) с одинаковыми физико-механическими свойствами –  $H_{сл}$ , диаметре выпускных отверстий в барабане  $d_{вып}$ , режим вращения ротора обеспечивался из расчёта, что разность между частотой вращения между частотой вращения ротора и барабана, которая устанавливалась на мельнице системы «МКАД» была равна

частоте вращения ротора в мельнице системы «МАЯ» (табл. 2).

Такое соотношение частот вращения роторов позволяют обеспечить одинаковую физическую картину процесса измельчения в мельницах обоих типов и получить сопоставимые результаты энергозатрат измельчения исследуемого материала.

Таблица 2

Соотношение частот вращения роторов в мельнице системы «МКАД» и физической модели мельницы системы «МАЯ»

№ опытов	Параметры процесса								
	Мельница системы «МКАД»						Физическая модель мельницы системы «МАЯ»		
	Кинематическое несоответствие $i_{кн}$	Высота засыпки материала $H_{сл}$ , мм	Диаметр выпускных отверстий в барабане, $d_{вып}$ , мм	Частота вращения барабана $n_{бар}$ (МКАД), об/мин	Частота вращения ротора $n_{рот}$ (МКАД), об/мин	Разность частот вращения ротора и барабана, $\Delta n$	Частота вращения барабана $n_{бар}$ (МАЯ), об/мин	Частота вращения ротора $n_{рот}$ (МАЯ), об/мин	Разность частот вращения ротора и барабана $\Delta n$ , об/мин
1	0,42	500	9,0	292,4	614,4	322	0	329	329
2	0,42	500	5,0	292,4	614,4	322	0	329	329
3	0,42	260	9,0	292,4	614,4	322	0	380,4	329
4	0,42	260	5,0	292,4	614,4	322	0	380,4	329
5	0,32	500	9,0	196,4	614,4	418	0	431,2	431,2
6	0,32	500	5,0	196,4	614,4	418	0	431,2	431,2
7	0,32	260	9,0	196,4	614,4	418	0	431,2	431,2
8	0,32	260	5,0	196,4	614,4	418	0	431,2	431,2
9	0,22	380	7,0	172	768	596	0	582,8	582,8
10	0,38	380	3,4	292,4	768	475,6	0	481,9	481,9
11	0,38	178	7,0	292,4	768	475,6	0	481,9	481,9
12	0,48	380	7,0	292,4	614,4	322	0	329,7	329,7
13	0,38	380	10,4	292,4	768	475,6	0	481,9	481,9
14	0,38	581,2	7,0	292,4	768	475,6	0	481,9	481,9
15	0,38	380	7,0	292,4	768	475,6	0	481,9	481,9
16	0,38	380	9,0	292,4	768	475,6	0	481,9	481,9
17	0,38	500	7,0	292,4	768	475,6	0	481,9	481,9
18	0,42	500	7,0	292,4	614,4	322	0	380,4	380,4
19	0,42	380	9,0	292,4	614,4	322	0	380,4	380,4
20	0,38	260	7,0	292,4	768	475,6	0	481,9	481,9
21	0,38	380	5,0	292,4	768	475,6	0	481,9	481,9
22	0,32	380	5,0	196,4	614,4	418	0	431,2	431,2
23	0,32	260	7,0	196,4	614,4	418	0	431,2	431,2

Сравнение частот вращения роторов в мельницах системы «МАЯ» и «МКАД» показывает, что минимальная разность частот вращения составляет 1,3%, а максимальная 3,1%, что не может существенно повлиять на протекание режима измельчения и показатели по производительности и энергопотреблению

В результате проведения эксперимента 2-го этапа были определены минутная производительность мельницы системы «МАЯ» ( $G_{вых1}$ ) и удельные энергозатраты за период измельчения –  $e_{уд1}$  (кВт·ч/т), (табл. 2).

Энергопотребление за период измельчения определялось, как

$$E_i = \int_0^t N_i(dt), \text{кВт} \cdot \text{ч} \quad (1)$$

где  $N_i$  – мощность, потребляемая из сети в  $i$ -й момент времени, кВт;  $t_i$  – продолжительность измельчения материала, ч.

Так как в мельнице системы «МАЯ» потребляемая мощность будет равна мощности, потребляемой из сети при заторможенном барабане, то справедливым будет записать

$$E_i = \int_0^t N_{зат}(dt), \text{кВт} \cdot \text{ч}, \quad (2)$$

где  $N_{зат}$  – мощность, потребляемая из сети при заторможенном барабане, кВт.

На рис. 2 приставлен график зависимости изменения мощности, потребляемой из сети, полученный в одном из опытов на мельнице системы «МАЯ», а на рис. 3 – график изменения мощности в замкнутом контуре и мощности потреблённой из сети в мельнице системы «МКАД».

При этом мощность при заторможенном барабане в мельнице системы «МАЯ» будет равна мощности, потребляемой из сети для мельницы этой системы.

Удельные энергозатраты для мельницы системы «МКАД» определяться из выражения

$$e_{уд.i} = \frac{\int_0^t N_i dt}{G_{вых i}}, \text{кВт} \cdot \text{ч/кг} \quad (3)$$

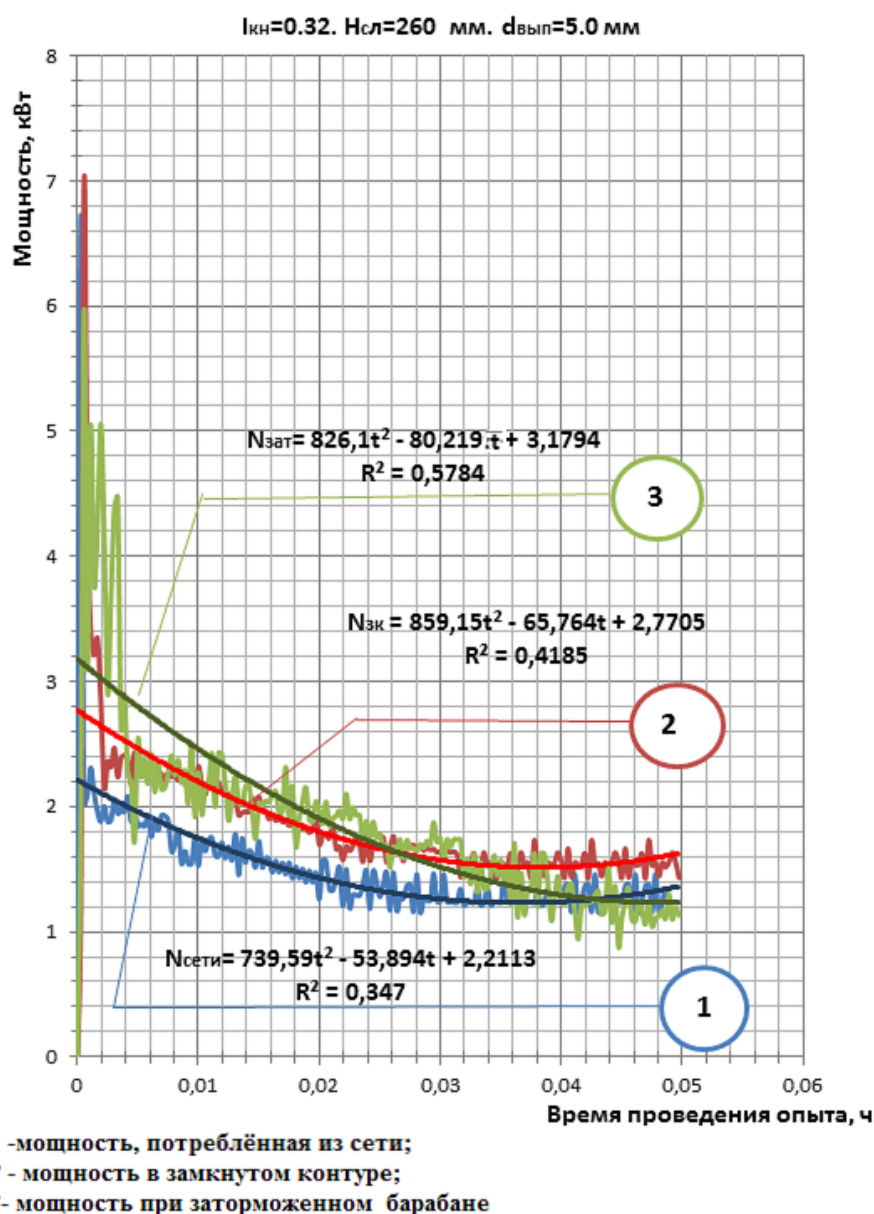


Рис. 2. Изменение мощности на роторе  $N_{зат}$  и в замкнутом контуре  $N_{зк}$  из опыта № 8 в мельницах системы «МАЯ» и «МКАД» при параметрах:

а) высота засыпки материала в барабане  $H_{сл} = 260$  мм; б) диаметр выпускных отверстий в барабане  $d_{вып} = 5,0$  мм

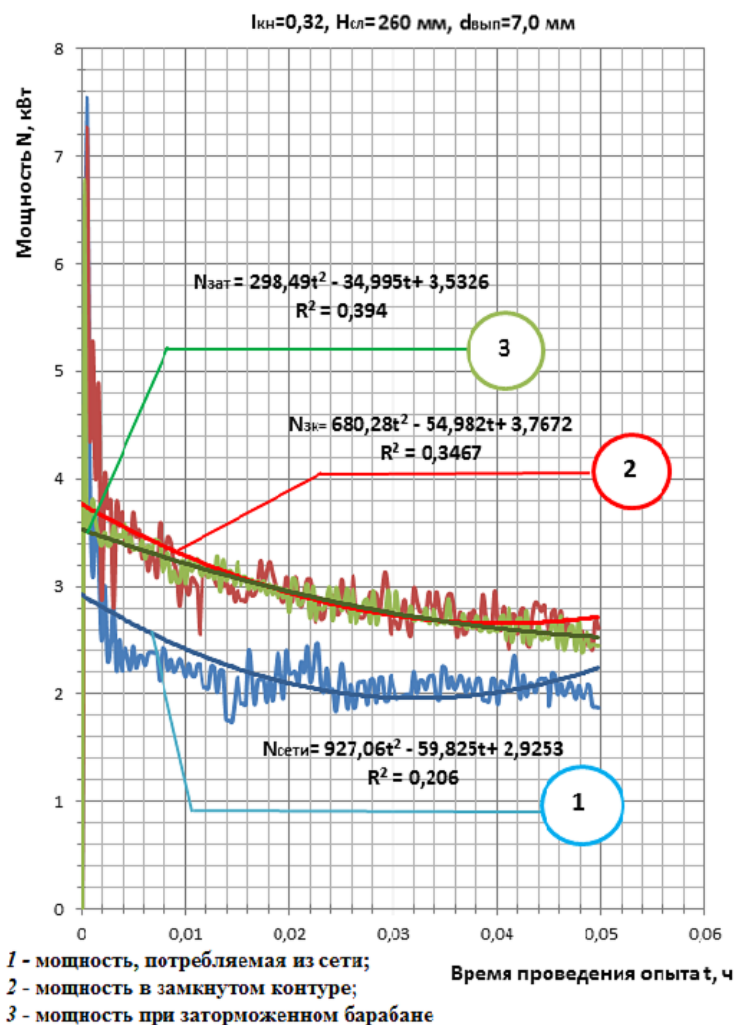


Рис. 3. Изменение мощности на роторе  $N_{зат}$  и в замкнутом контуре  $N_{зк}$  из опыта № 23 в мельницах системы «МАЯ» и «МКАД» при параметрах:  
а) высота засыпки материала в барабане  $H_{сл}=260$  мм; б) диаметр выпускных отверстий в барабане  $d_{вып}=7,0$  мм

Вычисление энергозатрат для опыта №8 для мельницы системы «МАЯ» на основе полученных графических зависимостей (см. рис. 2) по формуле (1) за период измельчения  $t$ , равный 3 мин (0,05 ч) даёт следующий результат

$$E_{зат8} = \int_0^{t_i} (826,1 \cdot t^2 - 80,219 \cdot t + 3,1794) dt = 0,093 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

Так как в мельнице системы «МКАД» мощность в замкнутом контуре превышает мощность, потребляемую из сети за счёт возникновения «циркулирующей» энергии, то для мельницы этой системы в 8-м опыте определяются из выражения

$$E_{сети8} = \int_0^{t_i} (739,59 \cdot t^2 - 53,894 \cdot t + 2,2113) dt = 0,074 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

Аналогично произведено вычисление энергозатрат для опыта №23 (см. рис. 3)

$$E_{зат23} = \int_0^{t_i} (298,49 \cdot t^2 - 34,995 \cdot t + 3,5326) dt = 0,145 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

$$E_{сети23} = \int_0^{t_i} (927,06 \cdot t^2 - 59,825 \cdot t + 2,9253) dt = 0,11 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

Аналогично проведены и остальные вычисления для опытов №1-8, и №23.

Удельные энергозатраты определялись по формуле

$$e_{удi} = \frac{E_i}{G_{выхi}}, \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{кг} \quad (3)$$

где  $G_{выхi}$  – вес материала, вышедшего из мельницы за период измельчения  $t_i$ .

Полученные результаты удельных энергозатрат для физической модели мельницы системы «МАЯ» сведены в табл. 3.

Таблица 3

**Результаты вычисления энергозатрат физической модели мельницы системы «МАЯ» для опытов 1-23**

№п/п	Частота вращения ротора $n_{рот}$ , об/мин	Энергозатраты за период измельчения $E_i$ , кВт·с / (кВт·ч)	Производительность мельницы за период измельчения $G_{выхi}$ , кг/3 мин	Период измельчения $t_i$ , мин /ч	Удельные энергозатраты $e_{удi}$ , кВт·ч/кг (кВт·ч/т)
1	380,4	0,112	6,49	3,0/0,05	5,75
2	380,4	0,181	4,97	3,0/0,05	12,14
3	380,4	0,12	6,42	3,0/0,05	6,23
4	380,4	0,12	4,14	3,0/0,05	9,62
5	431,2	0,181	7,65	3,0/0,05	7,89
6	431,2	0,144	3,71	03,0/0,05	12,94
7	431,2	0,112	6,33	3,0/0,05	5,99
8	431,2	0,093	3,78	3,0/0,05	8,21
9	582,8	0,247	10,06	3,0/0,05	8,18
10	481,9	0,186	2,98	3,0/0,05	20,81
11	481,9	0,099	3,90	3,0/0,05	8,46
12	329,7	0,213	5,91	3,0/0,05	12,01
13	481,9	0,21	11,1	3,0/0,05	6,31
14	481,9	0,258	6,22	3,0/0,05	13,26
15	481,9	0,225	6,69	3,0/0,05	10,87
16	481,9	0,211	9,95	3,0/0,05	7,07
17	481,9	0,25	6,42	3,0/0,05	12,98
18	380,4	0,23	6,13	3,0/0,05	12,51
19	380,4	0,17	7,27	3,0/0,05	7,79
20	481,9	0,187	3,88	3,0/0,05	16,65
21	481,9	0,175	4,41	3,0/0,05	13,23
22	431,2	0,108	3,76	3,0/0,05	9,57
23	431,2	0,145	6,06	3,0/0,05	7,98

В табл. 4 представлены обобщённые результаты экспериментальных исследований энергоэффективности мельниц систем «МАЯ» и

«МКАД» при измельчении мергеля с исходной крупностью исходных кусков  $d_{ср}=30$  мм.

Таблица 4

**Обобщённые результаты удельных энергозатрат вертикальных мельниц динамического самоизмельчения системы «МКАД» и «МАЯ»**

№ опытов	Частоты вращения роторов, об/мин $\frac{n_{рот(МКАД)}}{n_{рот(МАЯ)}}$	Разность частот вращения между ротором и барабаном, об/мин $\frac{n_{рот} - n_{бар(МКАД)}}{n_{рот} - n_{бар(МАЯ)}}$	Относительное отклонение частоты вращения роторов, %	Период измельчения $t$ , ч	Производительность за период измельчения, кг $\frac{G_{вых(МКАД)}}{G_{вых(МАЯ)}}$	Удельные энергозатраты $E_{уд}$ , кВт·ч/т $\frac{e_{уд(МКАД)}}{e_{уд(МАЯ)}}$
1	$\frac{614,4}{329}$	$\frac{322}{329}$	2,1	0,05	$\frac{6,14}{6,49}$	$\frac{4,72}{5,75}$
2	$\frac{614,4}{329}$	$\frac{322}{329}$	2,1	0,05	$\frac{4,84}{4,97}$	$\frac{10,81}{12,1}$
3	$\frac{614,4}{329}$	$\frac{322}{329}$	2,1	0,05	$\frac{6,35}{6,42}$	$\frac{5,51}{6,24}$
4	$\frac{614,4}{329}$	$\frac{322}{329}$	2,1	0,05	$\frac{3,98}{3,71}$	$\frac{6,79}{9,66}$
5	$\frac{614,4}{431,2}$	$\frac{418}{431,2}$	3,1	0,05	$\frac{7,56}{7,65}$	$\frac{5,25}{7,89}$

Продолжение таблицы 4

6	$\frac{614,4}{431,2}$	$\frac{418}{431,2}$	3,1	0,05	$\frac{3,59}{3,71}$	$\frac{11,05}{12,94}$
7	$\frac{614,4}{431,2}$	$\frac{418}{431,2}$	3,1	0,05	$\frac{6,20}{6,33}$	$\frac{4,68}{5,90}$
8	$\frac{614,4}{431,2}$	$\frac{418}{431,2}$	3,1	0,05	$\frac{3,65}{3,78}$	$\frac{6,53}{8,21}$
9	$\frac{768}{582,8}$	$\frac{596}{582,8}$	2,2	0,05	$\frac{9,96}{10,06}$	$\frac{7,46}{8,18}$
10	$\frac{768}{481,9}$	$\frac{475,6}{481,9}$	1,3	0,05	$\frac{2,71}{2,98}$	$\frac{20,66}{20,81}$
11	$\frac{768}{481,9}$	$\frac{475,6}{481,9}$	1,3	0,05	$\frac{3,84}{3,90}$	$\frac{7,90}{8,46}$
12	$\frac{614,4}{329,7}$	$\frac{322}{327,9}$	2,1	0,05	$\frac{5,98}{5,91}$	$\frac{8,91}{11,88}$
13	$\frac{768}{481,9}$	$\frac{475,6}{481,9}$	1,3	0,05	$\frac{10,8}{11,1}$	$\frac{4,97}{6,32}$
14	$\frac{768}{481,9}$	$\frac{475,6}{481,9}$	1,3	0,05	$\frac{6,30}{6,22}$	$\frac{12,54}{13,83}$
15	$\frac{768}{481,9}$	$\frac{475,6}{481,9}$	1,3	0,05	$\frac{6,87}{6,69}$	$\frac{7,28}{10,62}$
16	$\frac{768}{481,9}$	$\frac{475,6}{481,9}$	1,3	0,05	$\frac{9,92}{9,95}$	$\frac{7,28}{7,69}$
17	$\frac{768}{481,9}$	$\frac{475,6}{481,9}$	1,3	0,05	$\frac{6,53}{6,42}$	$\frac{6,32}{8,38}$
18	$\frac{614,4}{329}$	$\frac{322}{329}$	2,1	0,05	$\frac{6,28}{6,13}$	$\frac{11,38}{12,51}$
19	$\frac{614,4}{329}$	$\frac{322}{329}$	2,1	0,05	$\frac{7,36}{7,27}$	$\frac{6,25}{7,79}$
20	$\frac{768}{481,9}$	$\frac{475,6}{481,9}$	1,3	0,05	$\frac{4,03}{3,88}$	$\frac{12,74}{16,07}$
21	$\frac{768}{481,9}$	$\frac{475,6}{481,9}$	1,3	0,05	$\frac{4,53}{4,41}$	$\frac{11,62}{13,21}$
22	$\frac{614,4}{431,2}$	$\frac{418}{431,2}$	3,1	0,05	$\frac{3,91}{3,76}$	$\frac{7,0}{9,57}$
23	$\frac{768}{481,9}$	$\frac{418}{431,2}$	3,1	0,05	$\frac{5,94}{6,06}$	$\frac{6,17}{7,98}$

Анализ результатов частот оборотов роторов мельниц системы «МАЯ» и «МКАД» показывает, что относительная их разность не превышает 3,1 %. Поэтому можно с высокой долей уверенности утверждать, что при таких режимах вращения роторов мельниц обеих систем это не может существенно повлиять на протекание режима самоизмельчения, который протекает в мельнице системы «МАЯ», основные закономерности этого процесса установлены в исследованиях А.В. Ягупова, М.В. Гегелашвили и А.В. Выскребенца [18–21].

Проведённая серия экспериментов и анализ полученных результатов позволяют сделать следующие выводы.

1. Возникновение явления «циркуляции» энергии в вертикальной мельнице динамического самоизмельчения связано с выполнением верхней и нижней ветви замкнутого контура с кинематическим несоответствием относительного друг друга. Такой способ передачи потока мощности от приводного двигателя к верхней и нижней части столба измельчаемого материала приводит к скручиванию вала двигателя и накопле-

нию в нём потенциальной энергии, которая является источником дополнительного силового воздействия на разрушаемые в процессе движения частицы измельчаемого материала.

2. Производительность физической модели мельницы системы «МАЯ» в среднем превышает производительность мельницы системы «МКАД» на 4,1 %, что существенно не влияет на способ эвакуации измельчённого продукта из мельниц двух систем и влияет на результаты удельных энергозатрат измельчения.

3. Процесс эвакуации измельчённого до определённого размера частиц материала в пределах установленных диаметров выпускных отверстий, выполненных в боковых стенках вращающегося барабана, существенно не влияет на энергозатраты.

4. Среднее значение снижения удельных энергозатрат в мельнице системы «МКАД» по результатам 23-х опытов полнофакторного эксперимента составило 14,3 %.

5. Во всех 23-х опытах практически путём доказана возможность полезного использования так называемой «циркулирующей, а фактически даровой») энергии, которая позволяет при неизменной производительности обеспечить дополнительное силовое воздействие на частицы измельчаемого материала, что позволит снизить энергозатраты в мельницах, имеющих индифферентную структурную группу.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дровников А.Н., Остановский А.А., Маслов Е.В. Классификация вертикальных мельниц динамического самоизмельчения как основа создания измельчительного оборудования нового поколения // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. 2014. № 6. С. 12–17.
2. Дровников А.Н., Остановский А.А. Создание измельчителя динамического самоизмельчения // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3. С. 5–6.
3. 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.
4. Крайнев А.Ф. Словарь-справочник по механизмам. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1987. 560 с.
5. Остановский А.А. Анализ и выбор рациональной структурной схемы вертикальной мельницы динамического самоизмельчения // Известия Высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. С. 66–73.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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., Черкесов В.Ю.; заявка: 2014110456/13, заявл. 18.03.2014; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ), опубл. 27.07.2015, 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, опубл. 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, опубл. 25.01.1980, Бюл. №3. 4 с.

14. Гегелашвили М.В. Теоретические основы расчёта и конструирования мельниц динамического самоизмельчения. Дисс ... докт. техн. наук, Владикавказ: 2001. 331 С.

15. Кирпичев М. В. Теория размерности и теории подобия. Сборник «Теория подобия и моделирование», изд. АН СССР, 1951 г.

16. 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.

17. Ягупов А.В., Гегелашвили М.В. Некоторые закономерности движения материала в мельнице МАЯ / Сев.- Осет. гос. ун-т Сев-Кавк. горно-

металлург. ин-т. Орджоникидзе. 1984. 16 с Деп. в ЦНИИЭИцветмет. 3.05, 84. №1151-84 Деп.

18. Ягупов А.В., Хетагуров В.Н. Вертикальные мельницы динамического самоизмельчения и результаты их практического применения / Дробильно-размольное оборудование и технология дезинтеграции: Междувед. сб. науч. тр.// «Механообр». Л., 1991.

19. Хетагуров В.Н. Некоторые аспекты механизма разрушения материалов в центробежной мельнице вертикального типа // В юбилейном сборнике трудов, посвященных 50-летию электромеханического факультета и 50-летию научно-педагогической деятельности д.т.н., проф. Колева К.С. Владикавказ, 1995.

20. Гегелашвилл М.В., Хетагуров В.Н. К вопросу определения метода разрушения материалов в вертикальной мельнице самоизмельчения // Сб. науч. тр. СКГТУ №7. Владикавказ, 2000. С. 253–256.

21. Выскребенец А.С. Исследование процесса динамического самоизмельчения углеродистых материалов и его промышленное освоение: Дисс... канд. техн. наук, Владикавказ, СКПМИ. 1983. 168 с.

#### *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, 28.

**Дровников Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобили и транспортно-технологические комплексы».

E-mail: Aliacrinskiy@mail.ru

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова.

Россия, 346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

**Осипенко Людмила Аркадьевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование, технологии и дизайн».

E-mail: osipenko@.aanet.ru

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

Россия, 346500, г. Шахты Ростовской области, ул. Шевченко, д. 112.

**Маслов Евгений Владимирович**, заместитель начальника цеха Новочеркасского электровозостроительного завода (НЭВЗ), соискатель звания кандидат технических наук.

E-mail: E\_MASLOV@mail.ru

Россия, 352800, г. Туапсе, Краснодарский край, ул. Красных командиров, 29.

---

*Поступила в июле 2018 г.*

© Остановский А.А., Дровников А.Н., Осипенко Л.А., Маслов Е.В., 2018

**Ostanovsky A.A., Drovnikov A.N., Osipenko L.A., Maslov E.V.**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ENERGY EFFICIENCY OF VERTICAL MILLERS OF THE DYNAMIC SELF-MISSING OF THE «MAYA» SYSTEM AND «MKAD»**

*The necessity of conducting a series of experiments on the physical model of the mill of the MAYA system for the determination of energy inputs for grinding marl with an initial particle size  $d_{sr} = 30$  mm is substantiated. The procedure for converting the mill of the MKAD system to the physical model of the MAYA dynamic self-grinding mill is shown, which will yield comparable and objective results. The results of experimental studies of the specific power inputs of the mill of the MAYA and MKAD systems obtained on the experimental samples with equal design and regime parameters are presented. The graphs of the dependence of the energy consumption on the kinematic inconsistency of the closed loop branches, the height of the backfilling of the initial material and the diameter of the outlets in the drum of the mills of the compared systems are constructed. The results of specific energy costs for mills of two systems are presented, which show the higher energy efficiency of the mill of the "MKAD" system, the structural scheme of which has an indifferent group. This makes it possible to additionally use the potential energy from the twisting of the shaft of the drive motor for the destruction of the material particles*

**Keywords:** energy efficiency, energy consumption, specific energy consumption, productivity, kinematic mismatch, circulating power, indifferent structural groups.

**REFERENCES**

1. Drovnikov A.N., Ostanovsky A.A., Maslov E.V. Classification of vertical mills of dynamic self-crushing as basis of creation of the izmelchitelny equipment of new generation. News of higher educational institutions. North Caucasian region, 2014, no. 6, pp. 12–17.
2. Drovnikov A.N., Ostanovsky A.A. Creation of the grinder of dynamic self-crushing. Engineering bulletin of Don, 2012, no. 3, pp. 5–6.
3. Drovnikov A.N., Ostanovsky A.A. Systems of mills of dynamic self-crushing of planimetric type. Southern Russian state polytechnical university (NPI) of M.I. Platov. Novochoerkassk: YuRGPU(NPI), 2017, 183 p.
4. Kraynev A.F. The dictionary reference on mechanisms. 2nd prod., reslave. and additional M.: Mechanical engineering, 1987, 560 p.
5. Ostanovsky A.A. Analysis and choice of the rational block diagram of a vertical mill of dynamic self-crushing. News of Higher educational institutions. North Caucasian region. Technical science. P. 66–73.
6. Patent on an invention No. 2465960 the Russian Federation. MPK V02S13/14. Grinder dynamic samoizmelcheniya. Drovnikov A.N., Ostanovsky A.A., Nikitin E.V., Pavlov I.A., Osipenko L.A., Agafonov N.A.; Application: 2011106231/13, for-yavl. 17.02.2011; Patent holder: "Southern Russian State Technical University (Novochoerkassk Polytechnical Institute)" public educational institution of higher professional training, publish 10:11 2012 Bulletin no. 31, 5 p.
7. Patent on an invention No. 2496581 the Russian Federation. MPK V02S13/14. Grinding machine Drovnikov A.N., Ostanovsky A.A., Maslov E.V., Burkov N.V., Romanenko G.N.; Application: 2012124864/13, заявл. 6/14/2012; Patent holder: State educational institution of the highest professional education "Southern Russian state technical university (Novochoerkassk polytechnical institute)" (RU), Opubl. 10:11 2012 Bulletin no. 31, 5 p.
8. Patent on an invention No. 2520008 the Russian Federation. MPK V02S13/14. Grinder of dynamic self-crushing Material. Drovnikov A.N., Ostanovsky A.A., Maslov E.V., Rybalchenko A.N.; 2013105689/13; заявл. 11:02. 2013; Patent holder: Federal state-funded educational institution of higher education "Southern Russian state university of economy and service" (FGBOU VPO "YuRGUES"), publish 20:06 2014, Bulletin no. 17, 4 p.
9. Patent on an invention No. 2526668 the Russian Federation MPK V02S13/14. The device for crushing Material. Drovnikov A.N., Ostanovsky A.A. Application: 2012149328/13, заявл. 11/19/2012; Patent holder: The federal state-funded educational institution of higher education "Southern Russian state university of economy and service" (FGBOU VPO of "YuRGUES") Is published (RU): 8/27/2014. Bulletin no. 19, 5 p.
10. Patent on an invention No. 2558205 the Russian Federation MPK V02S13/14. Mill. Drovnikov A.N., Ostanovsky A.A., Nikitin E.V., Maslov E.V., Gorodnyansky V.M., V. Yu. Circassians; application: 2014110456/13, declare 3/18/2014; Patent holder: Federal public budgetary educational institution of the highest professional education "Don state technical university" (DGTU), publish 7/27/2015, Bulletin no. 21, 6 p.
11. A.S. No. 651845 (USSR), MPK4 V 02 C13/14. Way of crushing Material. Yagu-pov A.V.; the applicant North Caucasian it is mountain - metallurgical institute. No. 2331562; declare 09:06 1976, publish 15:03. 1979, Bulletin no. 11, 3 p.
12. Yagupov A.V. New way of crushing of ores. Mountain magazine, 1976, no. 11, pp.71–73.

13. And. with. No. 710632 (USSR), MCI In 02 C 13/00. Mill of dynamic self-crushing "May". Yagupov A.V.; applicant North Caucasian mining and metallurgical institute, application No. 2325134; заявл. 17:02. 1976, publish 1/25/1980, Bulletin no. 3, 4 p.

14. Gegelashvili M.V. Theoretical bases of calculation and designing of mills of dynamic self-crushing. DSc, Vladikavkaz: 2001, 331 p.

15. Kirpichev M.V. Theory of dimension and theory of similarity. Collection "Theory of Similarity and Modelling", prod. Academy of Sciences of the USSR, 1951.

16. Ostanovsky A.A., Maslov E.V. To determination of productivity and specific energy consumption in a vertical mill of dynamic self-crushing with the power closed contour. News of higher educational institutions. North Caucasus region, 2015, no. 3, pp. 59–67.

17. Yagupov A.V., Gegelashvili M.V. Some regularities of a dvikzheniye of material in a mill MAY / Sowing. - Oset. state. un-t Sev-Kavk. mountain metallurgist. in-t. Ordzhonikidze. 1984. 16 p.

Depp. in Tsniieitsvetmet. 3.05, 84. no. 1151–84 Depp.

18. Yagupov A.V., Khetagurov V.N. Vertical mills of dynamic self-crushing and results of their practical application. Crushing размольное equipment and technology of disintegration: Mezhd-ved. Mekhanobr. L., 1991.

19. Khetagurov V.N. Some aspects of the mechanism of destruction of materials in a centrifugal mill of vertical type. In the anniversary collection of the works devoted to the 50 anniversary of electromechanical faculty and the 50 anniversary of scientific and pedagogical activity the DSc, the prof. Koleva K.S. Vladikavkaz, 1995.

20. Gegelashvili M.V., Khetagurov V.N. K to a question of definition of a method of destruction of materials in a vertical mill of self-crushing. Collection of scientific works no. 7 SKGTU. Vladikavkaz, 2000, pp. 25–256.

21. Vyskrebenets A.S. Research of process of dynamic self-crushing of carbonaceous materials and his industrial development: PhD Vladikavkaz, SKPMI, 1983, 168 p.

#### *Information about the author*

**Alexander A. Ostanovsky**, PhD, Assistant professor, chief engineer.

E-mail: ostanovskiy51@mail.ru

of «Optimumstroy» LLC.

Russia, 141130, city Ruza, Moscow region, st. Shkolnaya, 28.

**Alexander N. Drovnikov**, DSc, Professor.

E-mail: Aliacrinskiy@mail.ru

The South-Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov.

Russia, 346428, Novocheerkassk, st. Enlightenment, 132.

**Lyudmila A. Osipenko**, PhD, Assistant professor.

E-mail: osipenko@.aaanet.ru

Institute of Service and Entrepreneurship (branch) of Don State Technical University.

Russia, 346500, Chachti of the Rostov region, st. Shevchenko, 112.

**Evgeny V. Maslov**, Deputy Head of the Novocheerkassk Electric Locomotive Plant (NEVZ) workshop.

E-mail: E\_MASLOV@mail.ru

Russia, 352800, Tuapse, Krasnodar Region, st. Red commanders, 29.

---

*Received in July 2018*

#### **Для цитирования:**

Остановский А.А., Дровников А.Н., Осипенко Л.А., Маслов Е.В. Сравнительный анализ энергоэффективности вертикальных мельниц динамического самоизмельчения системы «МАЯ» И «МКАД» // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №9. С. 114–124. DOI: 10.12737/article\_5bab4a21f1f347.49352549

#### **For citation:**

Ostanovsky A.A., Drovnikov A.N., Osipenko L.A., Maslov E.V. Comparative analysis of the energy efficiency of vertical millers of the dynamic self-missing of the «МАЯ» system and «МКАД». Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2018, no. 9, pp. 114–124. DOI: 10.12737/article\_5bab4a21f1f347.49352549