

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ДИСКОВЫХ ДЕСЯТИВАЛКОВЫХ ГРОХОТОВ
КОКСОВОГО ЦЕХА № 1 АО «УРАЛЬСКАЯ СТАЛЬ»**

Дмитрий Рудольфович Ганин¹, канд. техн. наук (dmrgan@mail.ru)
Иван Андреевич Фролов² (i.frolov@uralsteel.com)

¹ Новотроицкий филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСИС», г. Новотроицк, 462359. Россия

² АО «Уральская Сталь», г. Новотроицк, 462353. Россия

Аннотация. В коксовом цехе № 1 (КЦ № 1) коксохимического производства (КХП) АО «Уральская Сталь» применяются грохоты дисковые десятивалковые сдвоенные, на которых происходит первоначальный рассев кокса по крупности на класс >25 мм, подаваемый конвейерами в бункеры крупного кокса для последующей погрузки в железнодорожные вагоны. Недостатки грохотов – сложность их конструкции, технического обслуживания и ремонтов, невысокие значения коэффициентов полезного действия (КПД) приводов. При эксплуатации грохотов возникают внеплановые простои оборудования. Для повышения надежности грохотов предложено модернизировать существующие приводы клетей для отсева кокса и механизма передвижения грохота на более простые и надежные, включающие мотор-редуктор. В результате модернизации грохотов упростится их конструкция, увеличится надежность; сократятся затраты на техобслуживание и ремонтно-восстановительные работы, внеплановые простои оборудования; снизится себестоимость продукции.

Ключевые слова: грохот десятивалковый, доменная печь, рассев кокса, привод, мотор-редуктор, модернизация

MODERNIZATION OF DISC TEN-ROLL SCREENS OF COKE SHOP № 1 OF JSC «URAL STEEL»

Dmitriy R. Ganin¹; **Ivan A. Frolov**²

¹ Novotroitsk branch of the National University of Science and Technology «MISIS», Novotroitsk. Russia

² JSC «Ural Steel», Novotroitsk. Russia

Abstract. In the coke shop (CC) No. 1 of the coke chemical production (KP) of JSC Ural Steel, double disc ten-roll screens are used, which are used for initial screening of coke by size to a class of +25 mm, which is fed by conveyors into large coke bunkers for subsequent loading into railway wagons. The disadvantages of screens are the complexity of their design, maintenance and repairs, and low values of the efficiency of the drives. Unplanned equipment downtime occurs during the operation of the screens. To increase the reliability of the screens, it is proposed to upgrade the existing drives of coke screening crates and the mechanism for moving the screen to simpler and more reliable ones, including a geared motor. As a result of the modernization of screens, their design will be simplified, reliability will increase; maintenance and repair costs, unplanned equipment downtime will be reduced; production costs will decrease.

Keywords: ten-roll screen, blast furnace, coke screening, drive, gear motor, modernization

Введение

В КЦ № 1 КХП АО «Уральская Сталь» в технологии производства и транспортировки кокса в доменный цех (ДЦ) применяются грохоты дисковые десятивалковые сдвоенные (двухклетьевые). На них после коксовых рампы № 1, 2 (батареи № 1, 3, 4) и № 3 (батареи № 5, 6) конвейерами К-1а, К-2а, К-1б, К-2б (первая коксортировка) и К-1ба, К-1бб (вторая коксортировка) подается кокс и происходит его первоначальный рассев

по крупности на класс >25 мм, подаваемый конвейерами К-8, К-19 в бункеры крупного кокса для последующей погрузки в железнодорожные вагоны [1].

От показателей качества кокса, определяемых качеством исходного сырья и условиями его переработки, зависят результаты работы доменных печей [2, 3]. А от бесперебойной работы грохотов дисковых десятивалковых сдвоенных напрямую зависят экономические показатели работы ДЦ и предприятия.

Недостатками грохотов являются сложность их конструкции, технического обслуживания и ремонтов, а также невысокие значения коэффициентов полезного действия (КПД) приводов [4–8]. Во время эксплуатации грохотов зачастую возникают внеплановые простои оборудования, связанные с их невысокой надежностью – комплексным свойством, включающим безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость или определенное сочетание этих свойств [9].

Цель работы – повышение надежности дисковых десятивалковых грохотов КЦ № 1 КХП АО «Уральская Сталь» с целью сокращения количества их внеплановых простоев и затрат на ремонтно-восстановительные работы, приводящих к снижению производства кокса.

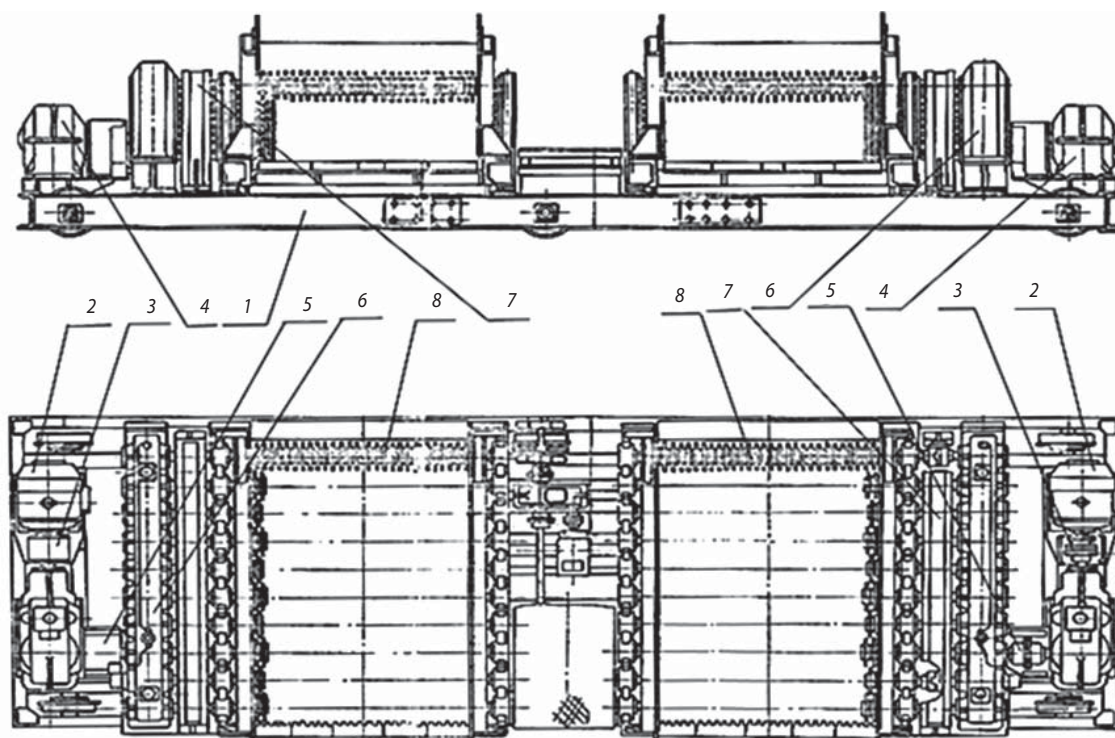
Основная часть

Грохот дисковый десятивалковый сдвоенный состоит из тележки 1, на которой смонтированы две клетки 8 для просеивания кокса: рабочая и резервная (рис. 1). Клеть состоит из десяти рабочих валков, расположенных параллельно друг другу, на которые насажены зубчатые диски. Валки смонтированы в подшипниках качения на жесткой раме и расположены в плоскости, находящейся под углом 15° к горизонту. Вращение валков с дис-

ками происходит с нарастающими скоростями по направлению уклона клетки, соответствующего направлению движения кокса. Валки с дисками образуют просеивающую поверхность с отверстиями, форма и размеры которых определяются расстояниями между валками и формой дисков.

Каждая клеть имеет индивидуальный привод, состоящий из электродвигателя 2, муфты упругой втулочно-пальцевой (МУВП) 3, редуктора коническо-цилиндрического 4, муфты зубчатой (МЗ) 5, коробки шестерен 6 и уравнивающих муфт 7. Тележка 1 представляет собой сварную раму, установленную на шести колесах, из которых два средних колеса приводные, а четыре крайних – холостые. Механизм передвижения грохота размещен в средней части тележки и состоит из электродвигателя, муфт типа МУВП и МЗ, редуктора цилиндрического двухступенчатого, открытых зубчатых передач. Колеса открытых зубчатых передач насажены на ступицы приводных колес.

Для смазки грохота используется централизованная система жидкой смазки, обслуживающая коробки шестерен и состоящая из плунжерных насосов, указателей течения масла, трубопроводов. Всасывание масла осуществляется из картеров коробок шестерен, а подача – по трубопроводам через крышки на верхние зубчатые передачи и подшипники коробок, затем оно стекает вниз,



Р и с. 1. Грохот дисковый десятивалковый сдвоенный:

1 – тележка; 2 – электродвигатель; 3 – муфты МУВП; 4 – редукторы коническо-цилиндрические; 5 – муфты МЗ; 6 – коробки шестерен; 7 – уравнивающие муфты; 8 – клетки

Техническая характеристика грохота дискового десятивалкового

Показатели	Значение
Производительность (пропускная способность одной клетки), т/ч	175
Частота вращения валков, мин ⁻¹	63–86
Окружная скорость дисков, м/с	0,5–0,9
Скорость передвижения грохота, м/с	0,06
Угол наклона валков, град.	15
Количество валков, шт.	10
Ширина клетки, мм	1650
Длина клетки, мм	2214
Электродвигатель привода клетки АО72-8:	
мощность, кВт	10
частота вращения, мин ⁻¹	970
Редуктор привода клетки КЦ1-300:	
передаточное число	20
крутящий момент на тихоходном валу, Н·м	2100
Электродвигатель механизма передвижения МТКН 12-6:	
мощность, кВт	3
частота вращения, мин ⁻¹	905
Редуктор механизма передвижения РЦД-250:	
передаточное число	40
номинальный крутящий момент на тихоходном валу, Н·м	1292
Открытая зубчатая передача:	
модуль	6
число зубьев колеса	72
число зубьев вал-шестерни	11
передаточное число	6,54
Масса, кг:	
без электрооборудования	26874,0
с электрооборудованием	27378,3
Габариты грохота в плане, мм:	
длина	8200
ширина	2750

Р и с. 2. Кинематическая схема привода клеток для отсева кокса:

- 1 – электродвигатель; 2 – предохранительная муфта;
 3 – редуктор коническо-цилиндрический;
 4 – муфта зубчатая; 5 – коробка шестерен;
 6 – муфты уравнивающие; 7 – клетки

смазывать остальные передачи и подшипники. Техническая характеристика дискового десятивалкового грохота приведена в таблице.

Кокс, поступивший на верхнюю часть рабочей клетки, встряхивается вращающимися зубчатыми дисками и скатывается с нарастающей скоростью по уклону, образованному дисками. При движении коксовая мелочь проваливается в квадратные ячейки, образованные дисками, а более крупные куски кокса скатываются с грохота. Кинематическая схема привода клеток для просеивания кокса приведена на рис. 2.

Частота вращения тихоходного (выходного) вала редуктора:

$$n_{\text{тих}} = n_{\text{ав}} / u_{\text{ред}} = 970 / 20 = 48,5 \text{ мин}^{-1},$$

где $n_{\text{ав}} = 970 \text{ мин}^{-1}$ – частота вращения вала электродвигателя АО72-8 привода клеток для отсева кокса; $u_{\text{ред}} = 20$ – передаточное число редуктора коническо-цилиндрического КЦ1-300.

Мощность на тихоходном (выходном) валу привода клеток для отсева кокса:

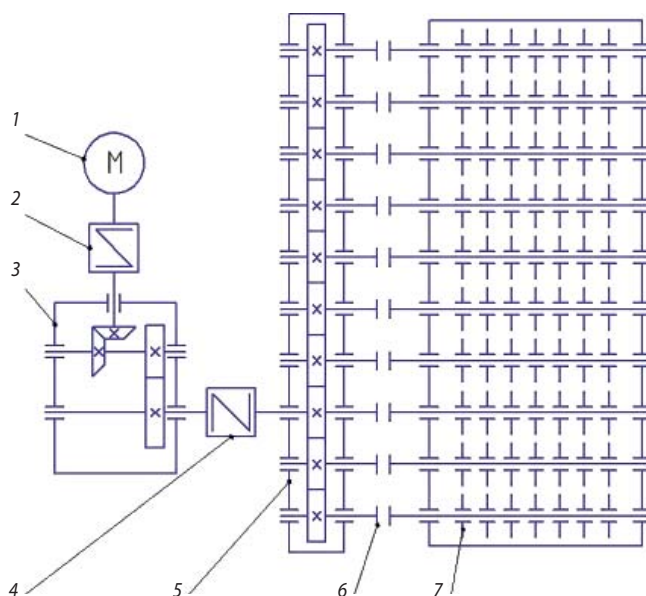
$$P_{\text{тих}} = P_{\text{ав}} \cdot \eta_{\text{м}}^2 \cdot \eta_{\text{ред}} = 10 \cdot 0,98^2 \cdot 0,93 = 8,93 \text{ кВт},$$

где $P_{\text{ав}} = 10 \text{ кВт}$ – мощность электродвигателя АО72-8 привода клеток для отсева кокса; $\eta_{\text{м}} = 0,98$ – КПД муфты [11, 12]; $\eta_{\text{ред}} = 0,97 \cdot 0,96 = 0,93$ – КПД коническо-цилиндрического редуктора КЦ1-300 с опорами [11, 12].

Крутящий момент на валу электродвигателя АО72-8:

$$T_{\text{ав}} = (P_{\text{ав}} / \omega_{\text{ав}}) \cdot 10^3 = 10 \cdot (10^3 / 101,5) = 98,5 \text{ Н·м},$$

где $\omega_{\text{ав}} = \pi n_{\text{ав}} / 30 = (3,14 \cdot 970) / 30 = 101,5 \text{ рад/с}$ – угловая скорость выходного вала электродвигателя привода клетки.



Крутящий момент на тихоходном (выходном) валу редуктора:

$$T_{\text{тих}} = T_{\text{ав}} \cdot u_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{м}}^2 \eta_{\text{ред}} = 98,5 \cdot 20 \cdot 0,98^2 \cdot 0,93 = 1759,5 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Для повышения надежности грохотов, сокращения числа их внеплановых простоев и уменьшения времени, затрачиваемого на ремонтно-восстановительные работы, необходима замена существующего привода клеток для отсева кокса, в состав которого входят электродвигатель, редуктор и две муфты, на более простой и надежный по конструкции, включающий мотор-редуктор, что позволит существенно облегчить техническое обслуживание и процесс ремонта грохота, сократив их время и трудоемкость [10]. Кинематическая схема модернизированного привода клеток для отсева кокса приведена на рис. 3.

Для модернизированного привода клеток для отсева кокса выбран коническо-цилиндрический мотор-редуктор типа К77DV160М4 с мощностью $P_{\text{ав}} = 11$ кВт, частотой вращения вала электродвигателя $n_{\text{ав}} = 1431$ мин⁻¹ и частотой вращения выходного вала мотор-редуктора $n_{\text{тих}} = 62$ мин⁻¹.

Передаточное число привода:

$$u_{\text{м-р}} = n_{\text{ав}} / n_{\text{тих}} = 1431 / 62 = 23,08.$$

Крутящий момент на валу электродвигателя:

$$T_{\text{ав}} = P_{\text{ав}} / \omega_{\text{ав}} = 11000 / 149,8 = 73,4 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где $\omega_{\text{ав}} = \pi n_{\text{ав}} / 30 = (3,14 \cdot 1431) / 30 = 149,8$ рад/с – угловая скорость выходного вала электродвигателя.

Крутящий момент на выходном валу мотор-редуктора:

$$T_{\text{тих}} = T_{\text{ав}} \cdot u_{\text{м-р}} \cdot \eta_{\text{м-р}} \eta_{\text{м}} = 73,4 \cdot 23,08 \cdot 0,94 \cdot 0,98 = 1560,5 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Расчетный момент для муфты:

$$T_{\text{р}} = K_1 \cdot K_2 \cdot T_{\text{тих}} = 1,2 \cdot 1,5 \cdot 1560,5 = 2808,9 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

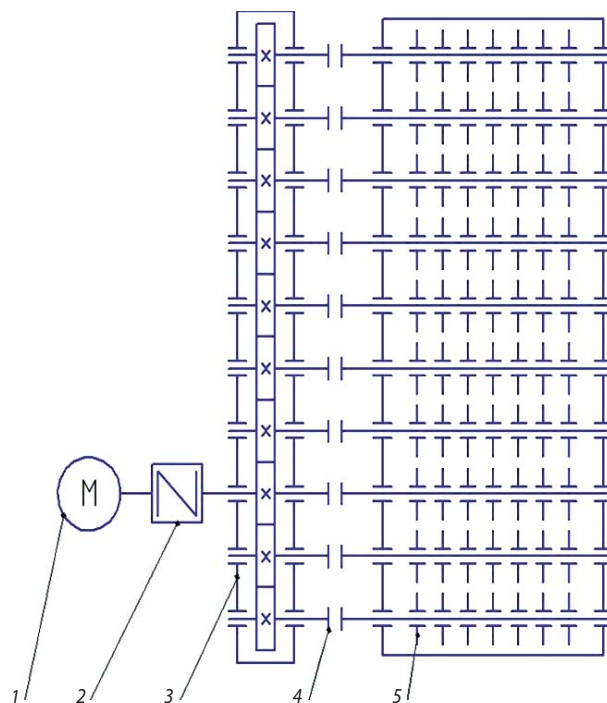
где $K_1 = 1,2$ – коэффициент ответственности передачи; $K_2 = 1,5$ – коэффициент условий работы муфты.

Выбираем муфту типа МЗ-3-Ø50/Ø55 с максимальным крутящим моментом $T_{\text{ном}} = 3150$ Н·м при максимальной частоте вращения $n_{\text{max}} = 4000$ мин⁻¹.

Для предупреждения недопустимой интенсивности изнашивания выполнен проверочный расчет:

$$p = \frac{T_{\text{р}}}{0,9 \cdot b \cdot d^2} = \frac{2808,9 \cdot 1000}{0,9 \cdot 20 \cdot 120^2} = 10,8 \text{ МПа},$$

где $b = 20$ мм – длина зуба; $d = m \cdot z = 3 \cdot 40 = 120$ мм – диаметр делительной окружности



Р и с. 3. Кинематическая схема модернизированного привода клеток для отсева кокса:

1 – мотор-редуктор; 2 – муфта зубчатая; 3 – коробка шестерен; 4 – муфты уравнивательные; 5 – клетки

втулки ($m = 3$ – модуль зацепления, мм; $z = 40$ – число зубьев втулки).

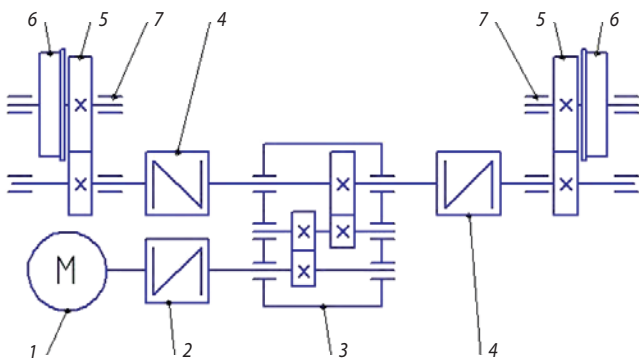
Допускаемое напряжение смятия $[p] = 12$ –15 МПа, условие $p = 10,8 \text{ МПа} \leq [p] = 12$ –15 МПа выполняется, муфта удовлетворяет расчетным характеристикам.

Существенным недостатком в работе грохота дискового десятивалкового сдвоенного являются относительно частые выходы из строя привода его механизма передвижения из-за износа открытых зубчатых передач и закрытых зубчатых передач цилиндрического редуктора. Причина этого – сложная конструкция и тяжелые условия работы привода, связанные с наличием в его составе открытых зубчатых передач, работающих в условиях повышенной запыленности. Общий КПД привода механизма передвижения грохота (рис. 4) невысокий, а затраты на его ремонтно-восстановительные работы повышенные.

Общий КПД привода механизма передвижения грохота:

$$\eta = \eta_{\text{м}}^3 \eta_{\text{з.п}}^2 \eta_{\text{о.п}}^2 \eta_{\text{п}}^4 = 0,98^3 \cdot 0,97^2 \cdot 0,96^2 \cdot 0,99^4 = 0,78,$$

где $\eta_{\text{м}} = 0,98$ – КПД муфты [11, 12]; $\eta_{\text{з.п}} = 0,97$ – КПД одной закрытой зубчатой цилиндрической передачи с опорами [11, 12]; $\eta_{\text{о.п}} = 0,96$ – КПД одной открытой зубчатой передачи на подшипниках ка-



Р и с. 4. Кинематическая схема привода механизма передвижения десятивалкового грохота:

1 – электродвигатель; 2 – муфта; 3 – редуктор цилиндрический; 4 – муфта; 5 – открытая зубчатая передача; 6 – ведущие колеса; 7 – подшипниковые узлы

чения с пластичным смазочным материалом [11, 12]; $\eta_{\text{п}} = 0,99$ – КПД одной пары подшипников качения [11, 12].

Передаточное число привода механизма передвижения грохота:

$$u = u_{\text{ред}} \cdot u_{\text{отп}} = 40 \cdot 6,545 = 261,8,$$

где $u_{\text{ред}} = 40$ – передаточное число редуктора; $u_{\text{отп}} = 6,545$ – передаточное число открытой зубчатой цилиндрической передачи.

Мощность на выходном валу привода механизма передвижения грохота:

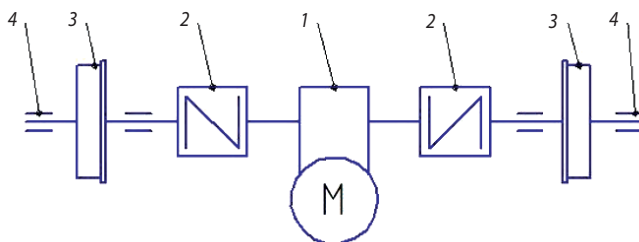
$$P_{\text{вых}} = P_{\text{ав}} \cdot \eta = 3 \cdot 0,78 = 2,34 \text{ кВт},$$

где $P_{\text{ав}} = 3$ кВт – мощность электродвигателя МТКН 12-6 привода механизма передвижения грохота.

Частота вращения выходного вала привода механизма передвижения грохота:

$$n_{\text{вых}} = n_{\text{ав}}/u = 905/268,1 = 3,46 \text{ мин}^{-1},$$

где $n_{\text{ав}} = 905 \text{ мин}^{-1}$ – частота вращения вала электродвигателя МТКН 12-6 привода механизма передвижения грохота.



Р и с. 5. Кинематическая схема модернизированного привода механизма передвижения десятивалкового грохота:

1 – мотор-редуктор; 2 – муфта зубчатая; 3 – ведущие колеса; 4 – подшипниковые узлы

Крутящий момент на валу электродвигателя МТКН12-6 привода механизма передвижения тележки до модернизации:

$$T_{\text{ав}} = (P_{\text{ав}}/\omega_{\text{ав}}) \cdot 10^3 = (3/94,7) \cdot 10^3 = 31,7 \text{ Н·м},$$

где $\omega_{\text{ав}} = \pi n_{\text{ав}}/30 = (3,14 \cdot 905)/30 = 94,7 \text{ рад/с}$ – угловая скорость вала электродвигателя МТКН 12-6 привода передвижения тележки.

Крутящий момент на валу ведущего колеса:

$$T_{\text{тих}} = T_{\text{ав}} \cdot u \cdot \eta_{\text{м}}^3 \eta_{\text{з.п}}^2 \eta_{\text{отп}}^4 = 31,7 \cdot 261,8 \cdot 0,98^3 \cdot 0,97^2 \cdot 0,96^2 \cdot 0,99^4 = 6506,3 \text{ Н·м}.$$

Для устранения указанных недостатков в конструкции и улучшения условий работы грохота необходима модернизация привода его механизма передвижения. Целесообразно заменить существующий привод на привод с более простой кинематической схемой и надежной конструкцией, включающей в себя мотор-редуктор, что облегчит техническое обслуживание и ремонты, сократив их стоимость, время и трудоемкость [10]. Кинематическая схема модернизированного привода передвижения грохота представлена на рис. 5.

Общий КПД модернизированного привода механизма передвижения грохота:

$$\eta = \eta_{\text{м}}^2 \eta_{\text{м-р}} \eta_{\text{п}}^2 = 0,98^2 \cdot 0,94 \cdot 0,99^2 = 0,88,$$

где $\eta_{\text{м}} = 0,98$ – КПД муфты [11, 12]; $\eta_{\text{м-р}} = 0,94$ – КПД мотор-редуктора; $\eta_{\text{п}} = 0,99$ – КПД одной пары подшипников качения [11, 12].

Для механизма передвижения грохота выбран коническо-цилиндрический мотор-редуктор типа К107R77DV100L4 с мощностью $P_{\text{ав}} = 3$ кВт, частотой вращения вала электродвигателя $n_{\text{ав}} = 1383 \text{ мин}^{-1}$ и частотой вращения выходного вала мотор-редуктора $n_{\text{тих}} = 3 \text{ мин}^{-1}$.

Передаточное число привода:

$$u = n_{\text{ав}}/n_{\text{тих}} = 1383/3 = 461.$$

Крутящий момент на валу электродвигателя:

$$T_{\text{ав}} = (P_{\text{ав}}/\omega_{\text{ав}}) \cdot 10^3 = (3/144,8) \cdot 10^3 = 20,7 \text{ Н·м},$$

где $\omega_{\text{ав}} = \pi n_{\text{ав}}/30 = (3,14 \cdot 1383)/30 = 144,8 \text{ рад/с}$ – угловая скорость выходного вала электродвигателя.

Крутящий момент на выходном валу мотор-редуктора:

$$T_{\text{тих}} = T_{\text{ав}} \cdot u_{\text{м-р}} \cdot \eta_{\text{м}}^2 \eta_{\text{ред}} = 20,7 \cdot 461 \cdot 0,98^2 \cdot 0,94 = 8614,9 \text{ Н·м}.$$

Частота вращения ведущего колеса:

$$n_{\text{в.к}} = \frac{1000 \cdot 60 \cdot v_{\text{г}}}{\pi D_{\text{в.к}}} = \frac{1000 \cdot 60 \cdot 0,06}{3,14 \cdot 400} = 2,9 \text{ мин}^{-1},$$

где $v_{\text{г}} = 0,06 \text{ м/с}$ – скорость передвижения грохота; $D_{\text{в.к}} = 400 \text{ мм}$ – диаметр ведущего колеса.

Расчетный момент для муфты:

$$T_p = K_1 \cdot K_2 \cdot T_{\text{тих}} = 1,2 \cdot 1,0 \cdot 8614,9 = 10337,9 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где $K_1 = 1,2$ – коэффициент ответственности передатки; $K_2 = 1,0$ – коэффициент условий работы муфты.

Выбрали муфту типа МЗ-3-Ø90/Ø100 с максимальным крутящим моментом $T_{\text{ном}} = 8000 \text{ Н}\cdot\text{м}$ при максимальной частоте вращения $n_{\text{max}} = 2800 \text{ мин}^{-1}$.

Для предупреждения недопустимой интенсивности изнашивания выполнен проверочный расчет:

$$p = \frac{T_p}{0,9 \cdot b \cdot d^2} = \frac{10337,9 \cdot 1000}{0,9 \cdot 30 \cdot 192^2} = 10,4, \text{ МПа},$$

где $b = 30 \text{ мм}$ – длина зуба; $d = mz = 4 \cdot 48 = 192 \text{ мм}$ – диаметр делительной окружности втулки ($m = 4$ – модуль зацепления, мм; $z = 48$ – число зубьев втулки).

Допускаемое напряжение смятия $[p] = 12\text{--}15 \text{ МПа}$, условие $p = 10,4 \text{ МПа} \leq [p] = 12\text{--}15 \text{ МПа}$ выполняется, муфта удовлетворяет расчетным характеристикам.

В результате модернизации грохотов упрощается их конструкция и увеличится надежность; увеличатся значения КПД приводов грохотов; сократятся затраты на техническое обслуживание и ремонтно-восстановительные работы, внеплановые простои оборудования; снизится себестоимость продукции.

Дополнительные капитальные затраты на модернизацию составят 3146,16 тыс. руб. при сроке их окупаемости 2,9 года. Себестоимость продукции при этом снизится с 22602,82 до 22598,66 руб./т.

Выводы

1. В результате анализа конструкций приводов клетей для рассева кокса и механизма передвижения дисковых десятивалковых сдвоенных грохотов КЦ № 1 АО «Уральская Сталь», при эксплуатации которых возникают внеплановые простои оборудования, связанные с невысокой надежностью, установлено, что их недостатками являются большая масса; сложность конструкции, технического обслуживания и ремонтно-восстановительных работ; невысокие значения КПД.

2. Предложено модернизировать существующие приводы клетей и механизма передвижения грохота на приводы с более простыми кинематическими схемами и надежными конструкциями, включающими мотор-редуктор.

3. В результате модернизации грохотов упростится их конструкция и увеличится надежность; увеличатся КПД приводов грохотов; сократятся затраты на техобслуживание и ремонтно-восстановительные работы, внеплановые простои оборудования; снизится себестоимость продукции.

Список источников

1. Грибанов Е. А., Ганин Д. Р., Фукс А. Ю. Повышение эффективности работы доменного производства АО «Уральская Сталь» за счет уменьшения содержания фракции +80 мм в металлургическом коксе // Черные металлы. 2023. № 11 (1103). С. 4–7. DOI 10.17580/chm. 2023.11.01

2. Ганин Д. Р., Грицай В. В., Фукс Е. А. Мероприятия для экономии кокса на тонну выплавляемого чугуна в условиях АО «Уральская Сталь» // Черные металлы. 2025. № 4 (1120). С. 16–21. DOI 10.17580/chm. 2025.04.03

3. Guo J., Shen Y., Wang M., Kong J. et al. Impact of chemical structure of coal on coke quality produced by coals in the similar category // J. of Analytical and Applied Pyrolysis. 2022. Vol. 162. P. 105432.

4. Андреев Е. Е., Тихонов О. Н. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению: Учебник. СПб : Санкт-Петербургский гос. горный ин-т (технический университет), 2007. 439 с.

5. Мальгин А. В., Мальцев В. А., Видуецкий М. Г. Рудоподготовительные процессы в плавильном производстве. Екатеринбург : ООО МАК «День РА», 2016. 415 с.

6. Вайсберг Л. А., Картавый А. Н., Коровников А. Н. Просеивающие поверхности грохотов. Конструкции, материалы, опыт применения. СПб : ВСЕГЕИ, 2004. 252 с.

7. Вайсберг Л. А., Устинов И. Д. Введение в технологию разделения минералов. СПб : Русская коллекция, 2019. 168 с.

8. Вайсберг Л. А., Кононов О. В., Устинов И. Д. Основы геометаллургии. СПб : Русская коллекция, 2020. 376 с.

9. Бильдюк Н. А., Каратушин С. И., Малышев Г. Д. и др. Детали машин / Под общ. ред. В. Н. Ражикова: Учебник. СПб. : Политехника, 2015. 695 с.

10. Гранкин М. Г. Практический справочник по выбору деталей машин. Ростов н/Д: Феникс, 2011. 498 с.

11. Дунаев П. Ф., Леликов О. П. Конструирование узлов и деталей машин. М. : Изд. центр «Академия», 2003. 496 с.

12. Иванов М. Н., Финогенов В. А. Детали машин. М. : Высшая школа, 2003. 408 с.

Статья поступила в редакцию 10.07.2025;
одобрена после рецензирования 15.08.2025;
принята к публикации 12.09.2025