



МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

УДК 622.6

А.С. РОМАНОВИЧ

генеральный директор¹

И.А. КОНОПЛЯНИК, канд. техн. наук

заместитель генерального директора по технической политике и инновациям¹

E-mail: kia@niva.by

¹УПП «Нива», Солигорский район, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 08.04.2019.

НАГРУЖЕННОСТЬ ПРИВодОВ РЕЖУЩИХ ОРГАНОВ ГОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ. ЧАСТЬ 1. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К МОНИТОРИНГУ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ОРГАНА ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА ПО ПАРАМЕТРАМ НАГРУЖЕННОСТИ ЕГО ПРИВОДА

Предложена математическая модель нагруженности привода режущего органа барабанного типа очистного комбайна, комплексно учитывающая скорость его движения, угловую скорость вращения режущего органа, угол конусности режущей части и количество резцов, использование которой на стадии проектирования позволяет с учетом показателя сопротивляемости силвенита руды резанию, угла конусности и ширины барабана технически обосновано оценить требуемую номинальную мощность привода, а при функционировании комбайна — определить действительное значение условного показателя сопротивляемости калийной руды резанию для выбора наиболее рациональных, с позиций повышения производительности, геометрических параметров резцов и оснастки для их крепления. Предложены аналитические зависимости, связывающие нагруженность привода режущего органа и производительность процесса резания с режимами функционирования очистного комбайна, включая скорость его движения и частоту вращения режущего органа, углом конусности резцов и их числом, анализ которых показал, что уменьшение угла φ резцов позволяет, не повышая нагруженность привода, увеличить производительность комбайна на 10–20 %, однако при этом необходимо учитывать прочностные свойства и износостойкость резцов, взаимосвязь возрастающей толщины срезаемого слоя с конструктивными параметрами режущего инструмента и державок, а также влияние глубины резания на состав по геометрическим параметрам добываемой породы.

Ключевые слова: колебания усилия резания, моделирование, нагруженность, режимы функционирования, привод, производительность

Введение. Электромеханический привод режущих органов горного оборудования можно отнести к одному из его основных компонентов, определяющих производительность этого оборудования. Его мощность определяется исходя из прогнозируемого объема добычи за единицу времени конкретизированного ископаемого, свойства которого могут варьироваться в определенном

диапазоне. Кроме того, сопротивление резанию тесно взаимосвязано как с параметрами и свойствами используемых резцов, степенью их затупления и возникновением поломок из-за инородных включений в массиве горной породы в процессе работы, так и со скоростью движения оборудования в направлении выработки (скорость вращения рабочего органа в существующем оборудовании

для подземных работ, как правило, не регулируется). В связи с тем, что к наиболее рациональным режимам работы привода можно отнести реализацию номинальной мощности привода в процессе его функционирования для защиты его электродвигателя от перегрева, в автоматическом [1] или ручном [2] режимах осуществляется снижение скорости движения для сохранения номинального режима функционирования привода.

К одним из основных тенденций развития современных приводных систем можно отнести повышение их удельной мощности, использование в системах управления и контроля цифровых технологий. Это позволяет существенно расширить возможности автоматизированного выбора и обеспечения наиболее эффективных режимов их функционирования и современных средств мониторинга. Использование последних при наличии соответствующих алгоритмов обработки диагностической информации может позволить идентифицировать причину отклонений по сравнению с прогнозируемыми условиями функционирования режущего органа, в частности, связав ее с исходным состоянием режущего органа, характеризующим качество изготовления резцов, их равномерным износом или поломками, что позволяет технически обосновано определить наиболее рациональные, с позиций производительности и энергоэффективности, режимы работы оборудования.

Вопросам нагруженности привода режущего органа и обеспечения наиболее рациональных режимов работы горного оборудования посвящено значительное число работ [3–25]. Однако в них, как правило, рассматривается процесс равномерного износа резцов прямоугольной формы с твердосплавными вставками при постоянных скоростях резания и определенных свойствах обрабатываемой породы, в качестве которой в основном рассматривается уголь. Вместе с тем анализ реальной практики подземной разработки полезных ископаемых показывает, что при этом из-за наличия достаточно характерных инородных включений к весьма типичным явлениям можно отнести поломку резцов. Оперативное выявление этого, определение координаты поломанного резца и своевременная его замена позволяют существенно повысить эффективность работы. Кроме того, появление современных методов упрочнения инструмента [26–28], расширение возможностей варьирования режимами резания, тесно связанными с гранулометрическими параметрами кусков добываемой руды, и мониторинга режимов функционирования привода режущего органа обуславливает актуальность проведения исследований взаимосвязи нагруженности привода режущего органа с учетом его состояния и режимами функционирования. Для Республики Беларусь эта тема весьма актуальна, поскольку до-

быча калийных солей является одной из основных валютообразующих составляющих ее бюджета.

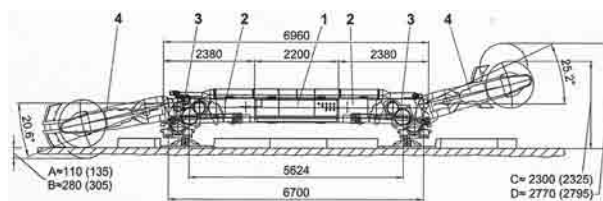
Цель исследований — разработка и исследование математической модели нагруженности привода режущего органа барабанного типа очистного комбайна, учитывающая режимы функционирования комбайна и особенности режущего органа, использование которой позволяет установить закономерности, связывающие их с мощностью электромеханического привода.

Математическая модель нагруженности привода. В качестве объекта исследований принят привод режущего органа комбайна SL 300NE-2W (рисунок 1), используемого при добыче калийной соли.

Диапазон рабочих скоростей движения комбайнов SL 300NE-2W составляет $V = 2...11,3$ м/мин, однако в реальных условиях рудников Старобинского месторождения не превышает 3,6 м/мин, т. е. варьируется в диапазоне $V = 2...3,6$ м/мин $\approx 0,03...0,06$ м/с. В значительной мере он определяется мощностью привода режущего органа, составляющей 400 кВт, ограниченной его тепловой нагруженностью. При затуплении или поломке резцов сопротивление движению возрастает и скорость движения комбайна автоматически снижается для уменьшения толщины срезаемого слоя. Как следствие, сопротивление вращению режущего органа снижается для сохранения номинальной мощности привода, исключающей перегрев и выход из строя его электродвигателя. При



a



b

Рисунок 1 — Общий вид (a) и технические параметры (b) очистного комбайна SL 300NE-2W: 1 — электродвигатель; 2 — электропривод механизма подачи; 3 — механизм подачи; 4 — привод резания [1, 29]
Figure 1 — General view (a) and technical parameters (b) of the shearer SL 300NE-2W: 1 — electric motor; 2 — electric drive of feeding mechanism; 3 — feeding mechanism; 4 — driver of cutting [1, 29]

этом уменьшаются размеры кусков добываемой руды, что в определенной мере усложняет ее последующую обработку и ограничивает как по производительности, так и качеству нижний уровень скорости движения.

Вращение режущего органа происходит с постоянной угловой скоростью $\omega \approx 5,1$ рад/с. При его диаметре $D = 1,250$ м это обеспечивает скорость резания $V_0 \approx 3,2$ м/с.

Траектория движения режущих кромок каждого из резцов, т. е. изменение их координат x, y от времени, может быть записана в следующем виде:

$$x(t) = V \cdot t + R \cdot \sin(\omega t); \quad (1)$$

$$y(t) = R \cdot \cos(\omega t). \quad (2)$$

Период резания каждого резца в течение полуоборота режущего органа (следующие пол-оборота резец движется вхолостую) составляет

$$T_0 = \frac{\pi}{\omega}. \quad (3)$$

С учетом этого уравнения (1), (2) могут быть приведены к более удобному для исследований безразмерному виду:

$$\frac{x(t/T_0)}{R} = \pi \frac{V}{V_0} \left(\frac{t}{T_0} \right) + \sin \left(\pi \frac{t}{T_0} \right); \quad (4)$$

$$y(t/T_0)/R = \cos \left(\pi \cdot t/T_0 \right). \quad (5)$$

Зависимость глубины резания от координаты резца может быть записана в виде:

$$\delta(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} - R, \quad (6)$$

откуда

$$\begin{aligned} \frac{\delta(t/T_0)}{R} &= \sqrt{\frac{x^2(t/T_0)}{R^2} + \frac{y^2(t/T_0)}{R^2}} - 1 = \\ &= \sqrt{1 + 2\pi \left(\frac{V}{V_0} \right) \left(\frac{t}{T_0} \right) \sin \left(\pi \frac{t}{T_0} \right) + \pi^2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \left(\frac{t}{T_0} \right)^2} - 1. \end{aligned} \quad (7)$$

Так как $V/V_0 \leq 0,01$, то

$$\pi^2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \left(\frac{t}{T_0} \right)^2 \ll 1 \quad (8)$$

и

$$\begin{aligned} \frac{\delta(t/T_0)}{R} &\approx \sqrt{1 + 2\pi \left(\frac{V}{V_0} \right) \left(\frac{t}{T_0} \right) \sin \left(\pi \frac{t}{T_0} \right)} - 1 \approx \\ &\approx \pi \left(\frac{V}{V_0} \right) \left(\frac{t}{T_0} \right) \sin \left(\pi \frac{t}{T_0} \right), \end{aligned} \quad (9)$$

и для максимальной δ_{\max} и средней δ_{cp} величин относительной толщины снимаемого слоя

$$\frac{\delta_{\max}}{R} \approx 1,8 \left(\frac{V}{V_0} \right), \quad (10)$$

$$\frac{\delta_{\text{cp}}}{R} \approx \frac{V}{V_0}. \quad (11)$$

Зависимость силы F резания может быть принята пропорциональной площади S срезаемого слоя, т. е.

$$F(t) = k_F k_R S(\delta), \quad (12)$$

где k_F — эмпирический условный показатель сопротивляемости калийной руды резанию, представляющий собой коэффициент пропорциональности между площадью срезаемого слоя и усилием резания, зависящий от сопротивления резанию срезаемого материала, состояния резца, его геометрии и т. п., Н/м²; k_R — отношение усилия резания частично изношенным резцом к усилию резания новым резцом, $k_R \geq 1$.

Поскольку сечение резца имеет треугольную с углом φ при вершине или прямоугольную форму, то для треугольной формы сечения резца

$$S_{\Delta} = 0,5\delta \cdot 2 \cdot \delta \sin(0,5\varphi) = \delta^2 \sin(0,5\varphi). \quad (13)$$

Отсюда зависимость для определения относительного изменения силы F резания для треугольной формы сечения резца при конкретизированных k_F, k_R, R, φ может быть представлена в виде:

$$\frac{F(t/T_0)}{k_F k_R R^2 \sin(0,5\varphi)} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \left[\left(\frac{t}{T_0} \right) \sin \left(\pi \frac{t}{T_0} \right) \right]^2. \quad (14)$$

Для n одновременно работающих равномерно размещенных по окружности резцов суммарная сила резания равна:

$$\begin{aligned} \frac{2F_{\Sigma}(t/T_0)}{k_F k_R n R^2 \sin(0,5\varphi)} &= \\ &= \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 \sum_{i=1}^{n/2} \left[\left(\frac{t}{T_0} + 2 \frac{i-1}{n} \right) \sin \left(\pi \frac{t}{T_0} + 2 \frac{i-1}{n} \right) \right]^2 = k_n^2 \left(\frac{V}{V_0} \right)^2, \end{aligned} \quad (15)$$

где n — число резцов на режущем органе; i — порядковый номер резца, расположенного в зоне резания от ее начала $i = 1; 2; 3...0,5n$;

$$k_n = \sum_{i=1}^{n/2} \left[\left(\frac{t}{T_0} + 2 \frac{i-1}{n} \right) \sin \left(\pi \frac{t}{T_0} + 2 \frac{i-1}{n} \right) \right].$$

Поскольку мощность N_0 привода, расходуемую на вращение режущего органа, можно считать величиной постоянной, то средняя относительная величина этой мощности без учета КПД электродвигателя и редуктора для конкретизированных величин k_F, k_R, n, R, V_0 может быть определена из зависимости

$$\frac{2\bar{F}_{\Sigma}(t/T_0)V_0}{k_F k_R n R^2 \cdot V_0} = \frac{2\bar{N}_0}{k_F k_R n R^2 \cdot V_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^2 k_n^2 \sin(0,5\varphi). \quad (16)$$

Из выражения (16) может быть определена величина k_F для режущего органа с новыми, соответствующими нормативным требованиям, резцами, для которых $k_R = 1$:

$$k_F = \frac{2\bar{N}_0}{n k_n^2 k_R R^2 \cdot V_0 (V/V_0)^2 \sin(0,5\varphi)}. \quad (17)$$

Использование величины k_F позволяет определить:

- качество изготовления резцов и режущего органа в целом по их геометрическим параметрам при отклонении действительного значения данного коэффициента от полученного в соответствии с условиями определения и зависимостью (17) при неизменных усредненных свойствах массива руды;
- соответствие требуемых свойств материала режущего инструмента по величине коэффициента k_R ;
- рациональную величину V по величине энергозатрат на единицу (массы или объема) полученной руды.

Результаты исследований и их обсуждение. Зависимость изменения относительных величин глубины резания δ/R от относительной координаты x/R и относительного времени t/T показана на рисунке 2.

Анализ рисунка 2 показывает следующее:

- максимальная толщина стружки при любой скорости движения комбайна снимается в момент времени (см. рисунок 2 *a*), соответствующий $\approx 0,65 T_0$, т. е. под углом $\pm 27^\circ$ («+» или «-» определяется в зависимости от направления вращения режущего органа) по отношению к направлению

движения комбайна, что целесообразно учитывать при создании системы мониторинга состояния режущего органа, включающей систему контроля колебаний усилия, воздействующего на кронштейн крепления режущего органа;

- зависимость максимальной глубины резания от скорости движения комбайна (см. рисунок 2 *b*) может быть описана линейной зависимостью

$$\delta = 2R(V/V_0); \quad (18)$$

- координата расположения максимальной глубины резания в направлении движения комбайна (см. рисунок 2 *c*) может быть описана линейной зависимостью

$$x = 1,82R(V/V_0), \quad (19)$$

что в сочетании с угловой координатой позволяет определить ее точное расположение;

- характер изменения толщины срезаемой по времени стружки в отличие от ее максимальной величины не зависит от скорости движения комбайна, частоты вращения его режущего органа и их соотношения (см. рисунок 2 *d-f*).

Характер изменения силы резания для фиксированного отношения V/V_0 одного резца показан

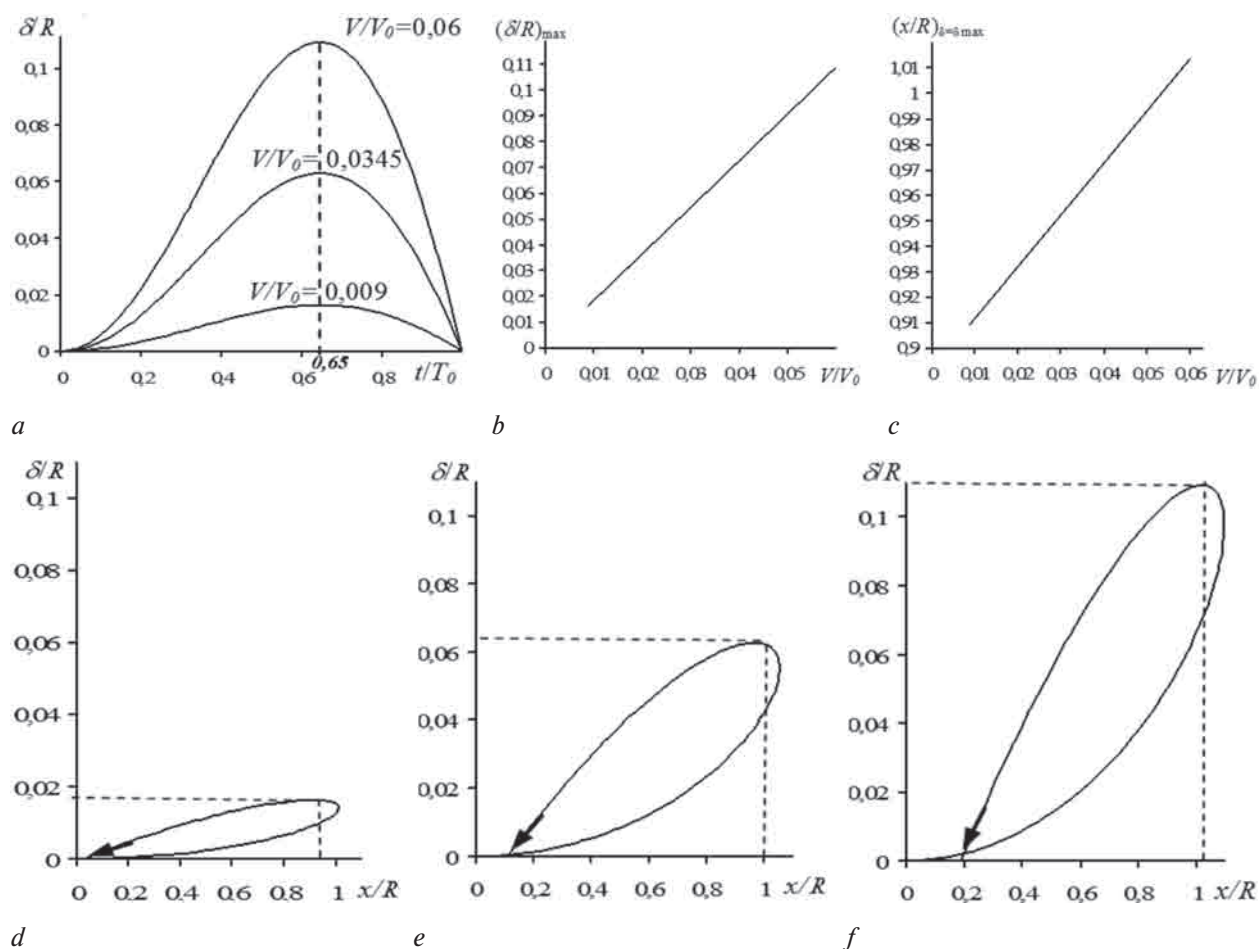


Рисунок 2 — Графики зависимостей δ/R : от времени резания (*a*); максимальной величины от V/V_0 (*b*) и ее координаты (*c*); схемы изменения глубины резания при $V/V_0 = 0,009$ (*d*); $V/V_0 = 0,0345$ (*e*) и $V/V_0 = 0,06$ (*f*)

Figure 2 — Graphs of dependencies δ/R : on cutting time (*a*); maximum value on V/V_0 (*b*) and its coordinates (*c*); schemes of changes of cutting depth with $V/V_0 = 0,009$ (*d*); $V/V_0 = 0,0345$ (*e*), and $V/V_0 = 0,06$ (*f*)

на рисунке 3 а, режущего органа — на рисунке 3 б, зависимость среднего значения коэффициента \bar{k}_n от n — на рисунке 3 с.

Анализ рисунка 3 показывает следующее:

- изменение нагрузки (см. рисунок 3 а) на резец с треугольным сечением близко к характеру из-

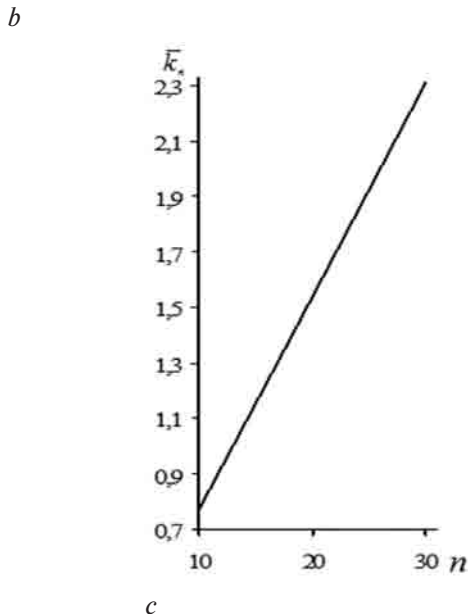
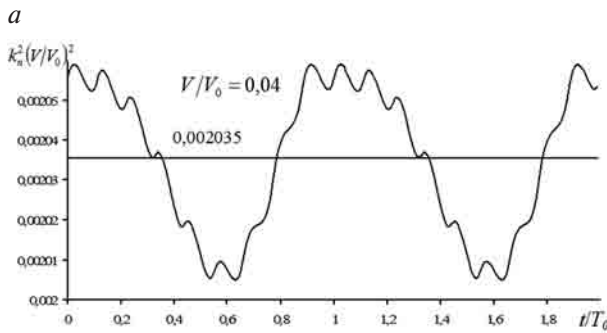
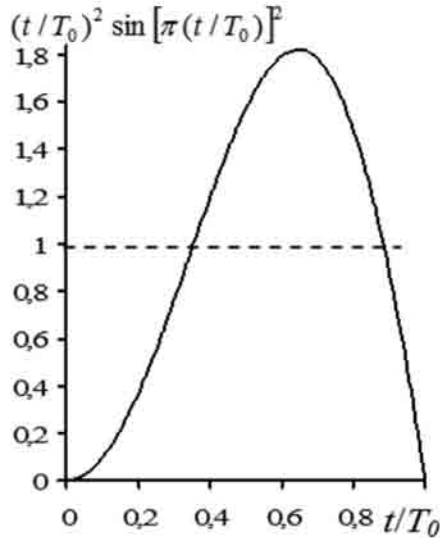


Рисунок 3 — Изменение силы резания одного резца для фиксированного отношения V/V_0 (а) и режущего органа (б) и зависимость среднего значения коэффициента \bar{k}_n от n (с)
 Figure 3 — Changing cutting force of a pick for fixed ratio V/V_0 (a) and cutting unit (b), and dependence of average value of coefficient \bar{k}_n on n (c)

- изменения глубины резания (см. рисунок 2 а), но в более резко выделенной квадратичной степени, причем также в квадратичной степени, т. е. нелинейно, в соответствии с зависимостью (14) возрастает нагрузка при увеличении скорости движения комбайна;

- характер изменения нагруженности режущего органа (см. рисунок 3 б) близок к периодическому и по существу содержит две гармоники, соответствующие удвоенной оборотной частоте и удвоенной частоте «врезания» резцов в обрабатываемый слой, причем амплитуды колебаний малы, а среднее квадратическое отклонение и коэффициент вариации в рассматриваемом случае составили соответственно всего $1,85 \cdot 10^{-5}$ и 0,9 %;

- величина среднего значения коэффициента \bar{k}_n от n в диапазоне $n = 10-30$ линейна и может быть аппроксимирована в аналитическом виде следующим образом:

$$\bar{k}_n = 0,77n, \quad (20)$$

причем, учитывая прогнозируемую небольшую вариацию этого коэффициента, она в полной мере отражает влияние числа резцов на нагруженность привода режущего органа и выражение (16) может быть записано в виде:

$$\frac{2\bar{N}_0}{k_F k_R R^2 \cdot V_0 \sin(0,5\varphi)} \approx 0,6 \cdot n^3 \left(\frac{V}{V_0}\right)^2. \quad (21)$$

Зависимость мощности резания от числа резцов n и отношения скорости движения комбайна V_0/V при фиксированных величинах k_F, k_R, R , и V_0 показана на рисунке 4. Анализ рисунка 4 и зависимости (21) показывает следующее:

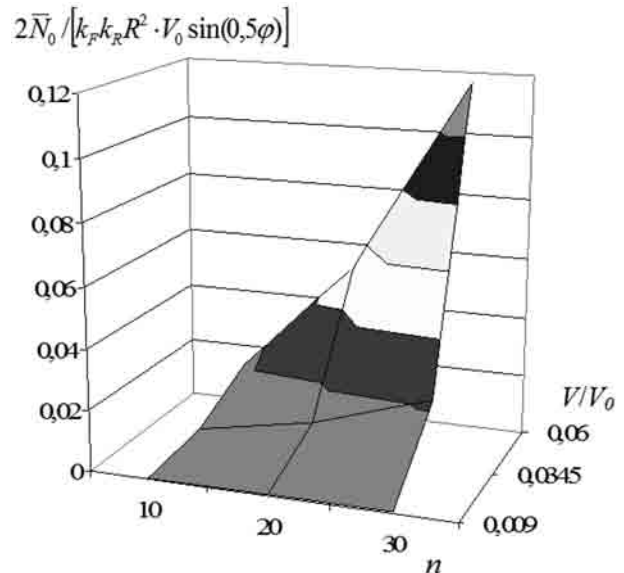


Рисунок 4 — Зависимость мощности резания от числа резцов n и отношения скорости резания к скорости движения комбайна при фиксированных величинах k_F, k_R, R и V_0
 Figure 4 — Dependence of cutting power on the number of picks n and ratio of cutting speed to movement speed of combine at fixed values k_F, k_R, R и V_0

- с увеличением скорости движения комбайна мощность, необходимая для обработки породы, возрастает в степенной функции (степени два), однако влияние количества резцов снижается;
- мощность резания пропорциональна кубу числа резцов при треугольной форме сечения их режущей части.

Необходимо отметить, что при равномерном износе резцов с учетом выражения (16)

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)^2 \sin(0,5\varphi) = const. \quad (22)$$

влияние угла φ на усилие резания, т. е. $\sin(0,5\varphi)$ как это видно из рисунка 5 а, практически линейно:

$$\sin(0,5\varphi) = 0,014 + 0,008\varphi, \quad (23)$$

причем с увеличением угла φ для $N_0 = const$ скорость движения комбайна и, как следствие, производительность комбайна снижается (см. рисунок 5 б) в соответствии с зависимостью

$$k_Q = 10 / \varphi^{0,475}. \quad (24)$$

Коэффициент влияния изменения угла φ на производительность по отношению к используемому в настоящее время углу $\varphi = 60^\circ$ может быть равен (см. рисунок 5 с)

$$k_Q^* = k_Q / k_{Q(\varphi=60^\circ)} = 6,7 \cdot \varphi^{-0,475}. \quad (25)$$

Таким образом, уменьшение угла φ позволяет, не увеличивая нагрузки привода, увеличить производительность комбайна на 10–20 %, однако при этом необходимо учитывать следующее:

- целесообразно использование инструмента и державок для его крепления с улучшенным комплексом прочностных свойств и износостойкости;
- с увеличением скорости движения комбайна возрастает глубина резания (см. рисунок 2 а) и необходимо проведение дополнительного анализа конструктивных параметров режущего инструмента и державок;
- увеличение глубины резания оказывает влияние на гранулометрический состав руды, вследствие чего необходима оценка их соответствия нормативным требованиям.

Необходимо отметить, что последняя проблема может быть успешно решена модифицированием привода режущего органа путем введения увеличения частоты его вращения.

Выводы. 1. Разработана математическая модель нагрузки привода режущего органа барабанного типа очистного комбайна, комплексно учитывающая скорость его движения, угловую скорость вращения режущего органа, угол конусности режущей части и количество резцов, использование которой на стадии проектирования позволяет с учетом показателя сопротивляемости силвенита руды резанию, угла конусности и ширины барабана определить номинальную мощность привода, а при функционировании

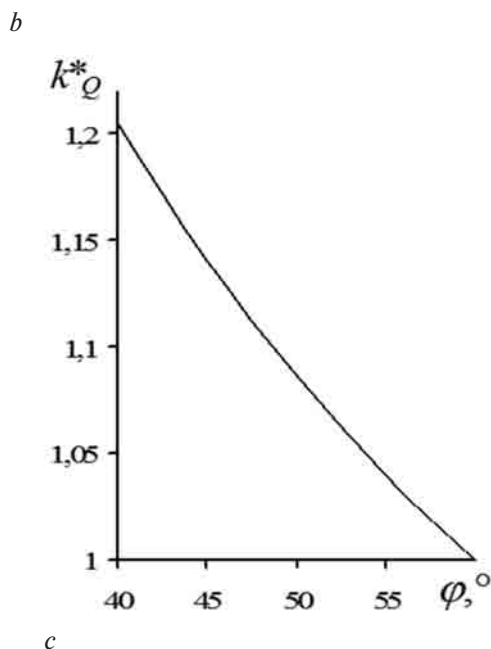
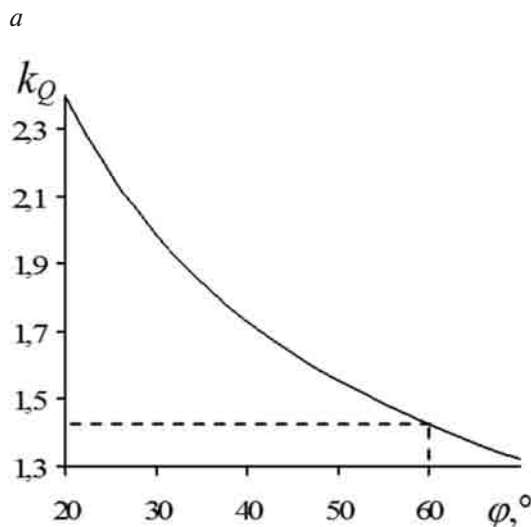
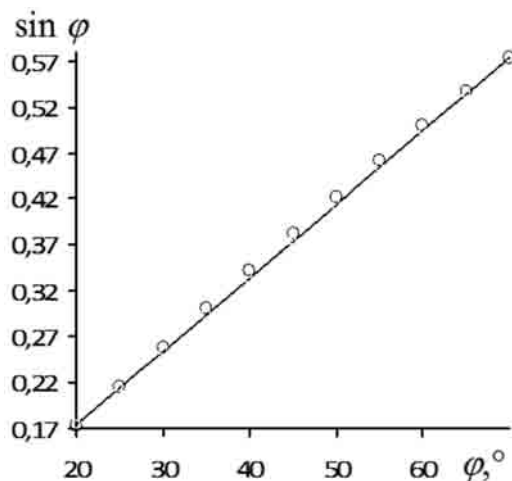


Рисунок 5 — Зависимость $\sin \varphi$ от φ (о — расчетная величина, — — аппроксимирующая прямая), снижение производительности комбайна при изменении φ (b) и по отношению к производительности при $\varphi = 60^\circ$ (c)
 Figure 5 — Dependence $\sin \varphi$ on φ (o — computed value, — — approximating straight line), reduction of combine performance when changing φ (b) and in relation to performance with $\varphi = 60^\circ$ (c)

комбайна — определить уточненное значение условного показателя сопротивляемости калийной руды резанию для выбора наиболее рациональной, с позиций повышения производительности, геометрических параметров резцов и оснастки для их крепления.

2. Предложены аналитические зависимости, связывающие нагруженность привода режущего органа и производительность процесса резания с режимами функционирования очистного комбайна, включая скорость его движения и частоту вращения режущего органа, углом конусности резцов и их числом, анализ которых показал, что уменьшение угла φ резцов позволяет, не повышая нагруженность привода, увеличить производительность комбайна на 10–20 %, однако при этом необходимо учитывать прочностные свойства и износостойкость резцов, взаимосвязь возрастающей толщины срезаемого слоя с конструктивными параметрами режущего инструмента и державок, а также влияние глубины резания на состав по геометрическим параметрам добываемой породы.

Список литературы

1. Горное дело [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://zinref.ru/000_uchebniki/0170lgornoe_delo/015_00_00_kombain_ochistnoi_Eickhoff_SL-300_2008_god_manual/001.htm. — Дата доступа: 22.02.2019.
2. Руководство по эксплуатации проходческо-очистного комбайна Урал-61 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.twirpx.com/file/1299086/>. — Дата доступа: 22.02.2019.
3. Трифанов, М.Г. Оценка нагруженности приводов проходческо-очистных комбайнов «Урал-20Р» для выбора технически обоснованных режимов работы в реальных условиях эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук / М.Г. Трифанов. — Пермь, 2018 — 164 с.
4. Горные машины и оборудование. Машины и оборудование подземных горных работ: учебно-методический комплекс / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. Д.А. Юнгмейстер. — СПб, 2017. — 117 с.
5. Клементьева, И.Н. Обоснование и выбор динамических параметров трансмиссии привода шнека очистного комбайна: дис. ... канд. техн. наук / И.Н. Клементьева. — М.: 2015. — 124 с.
6. Линник, В.Ю. Повышение эффективности функционирования шнековых исполнительных органов очистных комбайнов в различных условиях применения: автореф. дис. ... канд. наук / В.Ю. Линник; МГГУ. — М., 2004. — 20 с.
7. Концепция развития очистного, проходческого, конвейерного и бурового оборудования на период до 2020 г. / Ю.Н. Линник [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. — 2006. — № 3. — С. 2–6.
8. Шишлянников, Д.И. Повышение эффективности отделения калийной руды от массива резцами добычных комбайнов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Д.И. Шишлянников. — СПб., 2012. — 20 с.
9. Повышение эффективности эксплуатации проходческо-очистных комбайнов калийных рудников на основе анализа записей регистраторов параметров / Д.И. Шишлянников [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. — 2015. — № 4(113). — С. 3–10.
10. Выбор технически обоснованных режимов работы комбайнов «Урал» на основе оценки нагруженности их приводов в реальных условиях эксплуатации / Д.И. Шишлянников [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. — 2017. — № 7. — С. 3–8.
11. Хорешок, А.А. Влияние условий эксплуатации горных комбайнов на конструкцию их исполнительных органов / А.А. Хорешок, А.М. Цехин, А.Ю. Борисов // Горное оборудование и электромеханика. — 2012. — № 6. — С. 2–5.
12. Установление динамических характеристик подсистемы привода исполнительных органов очистного комбайна нового поколения / П.А. Горбатов [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. — 2008. — № 2. — С. 13–17.
13. Проектирование систем и процессов подземных горных работ с применением математических методов и моделей: монография / С.С. Гребенкин [и др.]; под общ. ред. С.С. Гребенкина и В.Д. Рябичева. — Донецк: ВИК, 2011. — 232 с.
14. Исследование нагруженности и возможности прогнозирования энергоресурса приводов исполнительных органов комбайна «Урал-20Р» / Г.Д. Трифанов [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. — 2013. — № 2. — С. 41–44.
15. Харламова, Н.А. Влияние глубины и шага резания на энергоёмкость разрушения и выход некондиционной мелкой фракции / Н.А. Харламова, В.Г. Зильбершмидт, М.Ф. Леонович // Изв. вузов. Горный журнал. — 1997. — № 1–2. — С. 8–12.
16. Харламова, Н.А. Исследование механизма разрушения соляных горных пород резцовым инструментом: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.11 / Н.А. Харламова. — Пермь, 1998. — 173 с.
17. Крапивин, М.Г. Горные инструменты / М.Г. Крапивин, И.Я. Раков, Н.И. Сысоев. — М.: Недра, 1990. — 256 с.
18. Результаты сравнительных исследований исполнительных органов комбайнов «Мариетта-900А» и «Урал-20Р» / В.В. Семенов [и др.] // Горное оборудование и электромеханика. — 2012. — № 2. — С. 11–15.
19. Красников, Ю.Д. Анализ теоретической производительности очистного комбайна при добыче силвинита / Ю.Д. Красников, Т.П. Шерба // Горное оборудование и электромеханика. — 2011. — № 8. — С. 34–37.
20. Ешин, Е.К. Теория предельных режимов работы горных машин / Е.К. Ешин. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1995. — 232 с.
21. Иванов, С.Л. Повышение ресурса трансмиссий горных машин на основе оценки энергонагруженности их элементов / С.Л. Иванов. — СПб.: Изд-во Санкт-Петербург. горного ин-та., 1999. — 92 с.
22. Модернизация рабочих органов проходческо-очистных комбайнов с целью снижения энергоёмкости разрушения и выхода мелких классов руды: отчет / руковод. Г.Д. Трифанов; ООО «РКЦ». — Пермь, 2005. — 41 с.
23. Красников, Ю.Д. Повышение надежности горных выемочных машин / Ю.Д. Красников, С.В. Солод, Х.И. Хазанов. — М.: Недра, 1989. — 215 с.
24. Пинский, В.Л. Развитие техники и технологии добычи калийных руд в России / В.Л. Пинский // Известия вузов. Горный журнал. — 2007. — № 8. — С. 13–17.
25. Еленкин, В.Ф. Современное состояние и перспективы развития конструкций очистных комбайнов со шнековыми исполнительными органами / В.Ф. Еленкин, И.Н. Клементьева, Р.М. Костин // Научный вестник МГГУ. — 2013. — № 1(34). — С. 44–54.
26. Дворников, Л.Т. К вопросу о повышении прочности тангенциальных поворотных резцов горных очистных комбайнов / Л.Т. Дворников, П.Д. Крестовоздвиженский // 117 Материалы XXI региональной научно-практической конференции по проблемам механики и машиностроения, Новокузнецк, 2011 / Сиб. гос. индустр. ун-т. — Новокузнецк, 2011. — С. 139–150.
27. Чекмасов, Н.В. Оценка эффективности процесса разрушения калийного массива резцами исполнительных органов комбайнов «Урал-20Р» / Н.В. Чекмасов, Д.И. Шишлянников, М.Г. Трифанов // Известия вузов. Горный журнал. — 2013. — № 6. — С. 103–107.
28. Ярьско, С.И. Физические и технологические основы упрочнения твердых сплавов: [монография] / С.И. Ярьско. — Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2006. — 244 с.
29. Вид комбайна SL 300NE-2 [Электронный ресурс] // Google. — Режим доступа: https://www.google.com/search?q=вид+комбайна+SL+300NE-2&rlz=1C1A0HY_ruBY788BY788&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=Xm9t_3pswZ2JYM%253A%252C1eVigwv33Xg7M%252C&usq=A14_kQw9pX9dgTXvlp. — Дата доступа: 19.02.2019.

ROMANOVICH Alexander S.

Director General¹

KANAPLIANIK Ivan A., Ph. D. in Eng.

Deputy Director General for Technical Policy and Innovations¹

E-mail: kia@niva.by

¹UPE “Niva”, Soligorsk District, Republic of Belarus

Received 08 April 2019.

LOAD OF CUTTING UNITS DRIVES OF MINING EQUIPMENT. PART 1. METHODOLOGICAL APPROACHES TO MONITORING OF TECHNICAL CONDITION OF SHEARER CUTTING UNIT BY PARAMETERS OF ITS DRIVE LOAD

A mathematical model of the load of the shearer drive of the drum type cutting unit is introduced. It takes into account the speed of its movement, the angular speed of rotation of the cutting unit, the taper angle of the cutting part and the number of picks. At design stage, its use makes it possible to determine the required rated drive power, taking into account sylvinitic resistance to cutting, the tapering angle and the drum width, and during the shearer operation, to determine the actual value of potash resistance to cutting index in order to select the most efficient value from the standpoint of productivity, geometric parameters of picks and tooling for their fastening. Analytical dependencies are suggested, linking the cutting unit drive load and the cutting process performance with the modes of shearer operation, including its movement speed and speed of the cutting unit rotation, the taper angle of the picks and their quantity, the analysis of which showed that reducing the pick angle φ makes it possible to increase the capacity of the shearer by 10–20 % without increasing the cutting unit load. However, it is necessary to take into account the strength properties and wear resistance of the picks, the interrelation of the increasing thickness of the sheared layer with the design parameters of the picks and pick holders, and cutting depth influence on particle size distribution of the mined ore.

Keywords: fluctuations of cutting force, modeling, load, modes of operation, drive, capacity

References

1. *Ochistnoy kombayn Eickhoff SL-300 – rukovodstvo po ekspluatatsii* [Shearer Eickhoff SL-300 – manual]. 2008. Available at: http://zinref.ru/000_uchebniki/0170Igoroe_delo/015_00_00_kombain_ochistnoi_Eickhoff_SL-300_2008_god_manual/001.htm (accessed 22 February 2019).
2. *Prokhodchesko-ochistnoy kombayn “Ural-61”. Rukovodstvo po ekspluatatsii* [Heading-and-winning machine “Ural-61”. Manual]. OAO “Kopeyskiy mashinostroitelnyy zavod” Publ., 2004. 246 p. Available at: <https://www.twirpx.com/file/1299086/> (accessed 22 February 2019).
3. Trifanov M.G. *Otsenka nagruzhennosti privodov prokhodchesko-ochistnykh kombaynov “Ural-20R” dlya vybora tekhnicheskii obosnovannykh rezhimov raboty v realnykh usloviyakh ekspluatatsii*. Diss. kand. tekhn. nauk [Evaluation of load of drives of heading-and-winning machines “Ural-20R” to select technically justified modes in actual operating conditions. Ph. D. Thesis]. Perm, 2018. 164 p.
4. Yungmeyster D.A. *Gornye mashiny i oborudovanie. Mashiny i oborudovanie podzemnykh gornykh rabot* [Mining machines and equipment. Machines and equipment for underground mining]. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet Publ., 2017. 117 p.
5. Klementeva I.N. *Obosnovanie i vybor dinamicheskikh parametrov transmisiy privoda shneka ochistnogo kombayna*. Diss. kand. tekhn. nauk [Justification and selection of dynamic parameters for transmission of drive screw of a shearer. Ph. D. Thesis]. Moscow, 2015. 124 p.
6. Linnik V.Yu. *Povyshenie effektivnosti funktsionirovaniya shnekovykh ispolnitelnykh organov ochistnykh kombaynov v razlichnykh usloviyakh primeneniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increase of functioning efficiency of screw actuating elements of shearers in various conditions of application. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Moscow, 2004. 20 p.
7. Linnik Yu.N., Krashkin I.S., Merzlyakov V.G., et al. *Kontseptsiya razvitiya ochistnogo, prokhodcheskogo, konveyernogo i burovogo oborudovaniya na period do 2020 g.* [Concept of development of stopping, heading, conveyor and drilling equipment for period up to 2020]. *Gornoe delo i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2006, no. 3, pp. 2–6.
8. Shishlyannikov D.I. *Povyshenie effektivnosti otdeleniya kaliynoy rudy ot massiva reztsami dobychnykh kombaynov*. Diss. kand. tekhn. nauk [Increase of efficiency of separation of potash ore from solid with cutters of mining combines. Extended Abstract of Ph. D. Thesis]. Saint Petersburg, 2012. 20 p.
9. Shishlyannikov D.I., Chekmasov N.V., Trifanov M.G., Gabov V.V., Ivanov S.L., Asonov S.A. *Povyshenie effektivnosti ekspluatatsii prokhodchesko-ochistnykh kombaynov kaliynykh rudnikov na osnove analiza zapisey registratorov parametrov* [Improving the efficiency of combines potash mines in the analysis of records]. *Gornoe delo i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2015, no. 4(113), pp. 3–10.
10. Shishlyannikov D.I., Trifanov M.G., Chekmasov N.V., Ivanov S.L. *Vybor tekhnicheskii obosnovannykh rezhimov raboty kombaynov “Ural” na osnove otsenki nagruzhennosti ikh privodov v realnykh usloviyakh ekspluatatsii* [The choice of technically justified operating modes of “Ural” combines on the basis of an estimation of their drivers load under real operating conditions]. *Gornoe delo i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2017, no. 7, pp. 3–8.
11. Khoreshok A.A., Tsekhin A.M., Borisov A.Yu. *Vliyaniye usloviy ekspluatatsii gornykh kombaynov na konstruktsiyu ikh*

- ispolnitelnykh organov [Influencing of operation conditions of mining machines on the design of their effectors]. *Gornoe delo i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2012, no. 6, pp. 2–5.
12. Gorbatov P.A., Lysenko N.M., Vorobev E.A., Potapov V.G., Rzhavskiy E.V., Voskresenskiy V.S. Ustanovlenie dinami-cheskikh kharakteristik podsistemy privoda ispolnitelnykh organov ochistnogo kombayna novogo pokoleniya [Establishment of dynamic characteristics of the drive subsystem of actuating elements of shearer of new generation]. *Gornoe delo i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2008, no. 2, pp. 13–17.
 13. Grebenkin S.S., Ryabichev V.D., Kukuyashnyy E.V., et al. *Proektirovanie sistem i protsessov podzemnykh gornykh rabot s primeneniem matematicheskikh metodov i modeley* [Design of underground mining systems and processes using mathematical methods and models]. Donetsk, “VIK” Publ., 2011. 232 p.
 14. Trifanov G.D., Knyazev A.A., Chekmasov N.V., Shishlyannikov D.I. Issledovanie nagruzhennosti i vozmozhnosti prognozirovaniya energoresursa privodov ispolnitelnykh organov kombayna “Ural-20R” [Load research and forecasting resources lead executive combine “Ural-20R”]. *Gornoe delo i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2013, no. 2, pp. 41–44.
 15. Kharlamova N.A., Zilbershmidt V.G., Leonovich M.F. Vliyaniye glubiny i shaga rezaniya na energoemkost razrusheniya i vykhod nekonditsionnoy melkoy fraktsii [Influence of depth and the step of cutting on the energy consumption of destruction and the yield of substandard fine fraction]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [News of the Higher Institutions. Mining Journal], 1997, no. 1–2, pp. 8–12.
 16. Kharlamova N.A. *Issledovanie mekhanizma razrusheniya solyanykh gornykh porod reztsovyim instrumentom*. Diss. kand. tekhn. nauk [Study of the mechanism of destruction of salt rocks with a tool. Ph. D. Thesis]. Perm, 1998. 173 p.
 17. Krapivin M.G., Rakov I.Ya., Sysyov N.I. *Gornyye instrumenty* [Mining tools]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 256 p.
 18. Semenov V.V., Shmakin I.G., Zhabin A.B., Chebotarev P.N. Rezultaty sravnitelnykh issledovaniy ispolnitelnykh organov kombaynov “Marietta-900A” i “Ural-20R” [Results of comparative researches of executive units of salt-mining machines “Marietta-900A” and “Ural-20R”]. *Gornoe delo i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2012, no. 2, pp. 11–15.
 19. Krasnikov Yu.D., Shcherba T.P. Analiz teoreticheskoy proizvoditelnosti ochistnogo kombayna pri dobyche silvinita [An analysis of a theoretical performance of a shearer by mining of silvinit]. *Gornoe delo i elektromekhanika* [Mining equipment and electromechanics], 2011, no. 8, pp. 34–37.
 20. Eshchin E.K. *Teoriya predelnykh rezhimov raboty gornykh mashin* [Theory of limit modes of operation of mining machines]. Tomsk, Tomskiy universitet Publ., 1995. 232 p.
 21. Ivanov S.L. *Povyshenie resursa transmissiy gornykh mashin na osnove otsenki energonagruzhennosti ikh elementov* [Increase of lifetime of transmissions of mining machines on the basis of assessment of energy load of their elements]. Saint Petersburg, Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet Publ., 1999. 92 p.
 22. Trifanov G.D. *Modernizatsiya rabochikh organov prokhdchesko-ochistnykh kombaynov s tselyu snizheniya energoemkosti razrusheniya i vykhoda melkikh klassov rudy: otchet* [Modernization of the working bodies heading shearers with the aim of reducing the energy intensity of destruction and yield of small classes of ore: report]. Perm, OOO “RKTs” Publ., 2005. 41 p.
 23. Krasnikov Yu. D., Solod S.V., Khazanov Kh.I. *Povyshenie nadezhnosti gornykh vymoechnykh mashin* [Improvement of reliability of mining winning machines]. Moscow, Nedra Publ., 1989. 215 p.
 24. Pinskiy V.L. Razvitie tekhniki i tekhnologii dobychi kaliynykh rud v Rossii [The development of machinery and the technology of extraction of potash ore in Russia]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [News of the higher institutions. Mining journal], 2007, no. 8, pp. 13–17.
 25. Elenkin V.F., Klementeva I.N., Kostin R.M. Sovremennoe sostoyaniye i perspektivy razvitiya konstruksiy ochistnykh kombaynov so shnekovymi ispolnitelnymi organami [Current state and prospects of development of designs of shearers with screw actuating elements]. *Nauchnyy vestnik MGGU* [Scientific herald of MSMU], 2013. no. 1(34), pp. 44–54.
 26. Dvornikov L.T., Krestovozdvizhenskiy P.D. K voprosu o povyshenii prochnosti tangentsialnykh povorotnykh reztsov gornykh ochistnykh kombaynov [Regarding durability increase of shearer pick attack cutter]. *Mashinostroyeniye. Materialy 21 regionalnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po problemam mekhaniki i mashinostroyeniya* [Mechanical Engineering. Proc. 21st regional scientific and practical conference on mechanics and mechanical engineering]. Novokuznetsk, 2011, no. 21, pp. 139–150.
 27. Chekmasov N.V., Shishlyannikov D.I., Trifanov M.G. Otsenka effektivnosti protsessa razrusheniya kaliynogo massiva reztzami ispolnitelnykh organov kombaynov “Ural-20R” [Evaluation of the effectiveness of mass destruction of potash massif by the cutters of executive parts of heading-shearers “Ural-20R”]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal* [News of the higher institutions. Mining journal], 2013, no. 6, pp. 103–107.
 28. Yaresko S.I. *Fizicheskie i tekhnologicheskoe osnovy uprochneniya tverdyykh splavov* [Physical and technological fundamentals of hardening of hard alloys]. Samara, Samarskiy nauchnyy tsentr RAN Publ., 2006. 244 p.
 29. *Vneslniy vid kombayna SL 300NE-2* [Appearance of combine SL 300NE-2]. Available at: https://www.google.com/search?q=вид+комбайна+SL+300NE-2&rlz=1C1AOHY_ruBY788BY788&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=Xm9t_3pswZ2JYM%253A%252C1eVigwv33Xxg7M%252C_&usg=AI4_-kQw9pX9dgTXvlp (accessed 19 February 2019).