УДК 622.232.72:622.363.2

Малахов Георгий Германович, аспирант
(КузГТУ, г. Кемерово)
Malakhov Georgy Germanovich, PhD student
(KuzSTU, Kemerovo)

Научный руководитель: Ананьев Кирилл Алексеевич, доцент, к.т.н.
(КузГТУ, г. Кемерово)
Scientific supervisor: Kirill Alekseevich Ananyev, associate Professor

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗОК НА РЕЗЦОВЫЙ ИНСТРУМЕНТ, РАБОТАЮЩИЙ В УСЛОВИЯХ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ
ANALYSIS OF EXISTING METHODS FOR DETERMINING THE LOADS ON CUTTING TOOLS OPERATING IN POTASH MINES

Аннотация: В статье проведен сравнительный анализ существующих отраслевых и теоретических методик определения силовых нагрузок на резцовый инструмент проходческо-очистных комбайнов, применяемых на калийных рудниках. Рассмотрены особенности эксплуатации тангенциальных неповоротных резцов (типа РС-14) в специфических горно-геологических условиях соляных месторождений. На основе исходных данных Старобинского месторождения выполнен поверочный расчет составляющих сил резания P_z и подачи P_y для острого и изношенного инструмента по трем методикам: ОСТ 12.44.258-84, методике ВНИИГ и методике В.В. Семенова. Установлено, что специализированные «солевые» методики показывают высокую сходимость по силе резания, однако существенно расходятся в оценке силы подачи затупленного инструмента.

Abstract: The article provides a comparative analysis of existing industry and theoretical methods for determining the force loads on the cutting tool of sinking and cleaning combines used in potash mines. The features of operation of tangential non-rotating cutters (type RS-14) in the specific mining and geological conditions of salt deposits are considered. Based on the initial data from the Starobinskoye field, a verification calculation of the components of the cutting forces Pz and feed Py for sharp and worn tools was performed using three methods: OST 12.44.258-84, the VNIIG method and the VV method. Semenova. It has been established that specialized "salt" techniques show high convergence in terms of cutting force, however, they differ significantly in estimating the feed force of a blunted tool.

Добыча полезного ископаемого на калийных рудниках РФ и ближнего зарубежья ведется подземным способом. Отделение породы от массива осуществляется механизированным способом с использованием

проходческо-очистных комплексов. Механическое отделение породы от массива получило наибольшее распространение благодаря высокой производительности и низким удельным энергозатратам по сравнению с буровзрывным способом, применение которого ограничено выделением токсичных газов в замкнутые выработки, сейсмическим воздействием на водозащитную толщу и отсутствием селективности, а также гидравлическому способу, критически затруднённому высокой естественной растворимостью калийных солей в воде, ведущей к технологическим потерям полезного ископаемого и потере устойчивости кровли.

На калийных рудниках РФ и ближнего зарубежья наибольшее применение нашли проходческо-очистные комбайны отечественного и Белорусского производства (типа «УРАЛ-20Р», «УРАЛ-61», КПО-10,5) с планетарно-дисковыми и роторными исполнительными органами (ПКС-8М, КРП-3), оснащёнными тангенциальными неповоротными резцами (РС-14, РС-14.У), либо тангенциальными поворотными резцами (РШ 25, РКС-1, РКС-2). По сравнению с тангенциальными поворотными резцами, тангенциальные неповоротные резцы обеспечивают малый выход мелких труднообогатимых фракций класса «–0,25 мм» и существенно более низкие ударные нагрузки на привод резания, что напрямую снижает интенсивность поломок поворотных редукторов ИО. Однако специфика кинематики роторного и планетарно-дискового ИО в сочетании с отсутствием самозатачивания у неповоротных резцов обуславливает высокий удельный расход инструмента, что актуализирует задачу точного определения нагрузок на режущую кромку.

Определение нагрузки на резце необходимо не только при разработки проходческой машины, но и при проектировании нового резцового инструмента под более тяжелые условия работы машины расчётом напряжённо-деформированного состояния державки и паяного соединения «твёрдый сплав – сталь» методом конечных элементов (МКЭ). При этом, как показывают экспериментальные исследования в работах [1, 2] боковые силы P_x по величине существенно меньше P_z и P_y, и при статическом расчёте средних нагрузок на приводы в большинстве случаев ими можно пренебречь без потери точности инженерных вычислений.

В рассматриваемых методиках суммарная нагрузка на резец раскладывается на три взаимно ортогональные составляющие:

- сила резания P_z – проекция равнодействующей сил на направление вектора абсолютной скорости движения резца (определяет нагрузку на привод вращения ИО);
- сила подачи P_y – проекция на направление вектора скорости подачи машины (определяет потребное напорное усилие механизма подачи);

- боковая сила P_x – проекция на направление, перпендикулярное плоскости резания (обусловлена разворотом резца и боковым развалом стружки).

Отраслевой стандарт ОСТ 12.44.258-84 (адаптированный для угольных комбайнов). Сила резания и подачи на резце с кинематическим задним углом определяется через набор эмпирических коэффициентов. Сила подачи на затупленном резце определяется через проекцию площадки затупления на плоскость резания и удельное давление q ≈ 10 кгс/мм². Методика является действующим нормативным документом, однако не учитывает хрупко-пластические свойства калийных солей и анизотропию их прочности.

$$\overline{P_z} = P_{z.o} + f'(y - y_o), \quad (1)$$

где $P_{z.o}$ – сила резания на остром резце, кгс; f' – коэффициент сопротивления резанию; $y - y_o$ – приращение сил подачи на затупленном резце (отжимающая сила резания), кгс.

$$\overline{P_y} = \overline{P_{y.o.}} + qS_{зат}, \quad (2)$$

где $\overline{P_{y.o.}}$ – сила подачи на технически остром резце, q – удельное давление на площадке затупления.

Отраслевая методика ВНИИГ («Комбайны проходческие для добычи руд», 1986 г.) [3]. Средняя сила резания неповоротного резца определяется по зависимости:

$$P_z = A_р h_{ср} k_{t/h} k_b k_\alpha k_{зат} k_\varphi k_\psi, \quad (3)$$

где $k_{t/h}$ – коэффициент степени блокированности; k_b – коэффициент ширины режущей кромки; k_α – коэффициент угла резания; $k_{зат}$ – коэффициент затупления; k_φ – коэффициент формы передней грани; k_ψ – коэффициент ориентации.

Сила подачи P_y определяется как доля от силы резания через поправочные коэффициенты, учитывающие глубину резания и разворот инструмента. Методика апробирована на рудниках ОАО «Сильвинит» и ПАО «Уралкалий», однако имеет ограниченную область применения из-за эмпирического характера коэффициентов.

$$P_y = 0{,}8 P_z k_\psi, \quad (4)$$

где P_{z0} – сила резания острым неразвёрнутым резцом; k_ψ – коэффициент, учитывающий влияние разворота инструмента относительно направления движения.

Методика «Семёнов В.В.» [4]. Силы резания и подачи определяются через систему параметров A, B, E, K, L, зависящих от геометрии и ориентации инструмента, а также прочностных свойств разрушаемого

массива. Прочностные свойства калийных руд оцениваются через пределы прочности на одноосное сжатие $\sigma_{сж}$ и сдвиг τ, связанные с сопротивляемостью резанию зависимостями $\sigma_{сж} = 0{,}128 \cdot A_{ДКС}$ и $\tau = 0{,}33 \cdot \sigma_{сж}$, что позволяет использовать единый прочностной показатель вне зависимости от метода его определения.

$$P_z = 100 \cdot [A \cdot E \cdot h^2 + (B \cdot E + 2 \cdot K \cdot f_з) \cdot h + f_з \cdot N_з] k_\beta; \quad (5)$$

$$P_y = 100 \cdot [A \cdot L \cdot h^2 + (B \cdot L + 2 \cdot K \cdot \sin(\varphi_к)) \cdot h + N_з] k_\beta, \quad (6)$$

где h – глубина резания; $f_з$ – коэффициент трения руды по задней поверхности резца; $N_з$ – усилие, действующее на заднюю поверхность резца, Н; $\varphi_к$ – конструктивный угол между боковой гранью неповоротного резца и его осью в плане или угол половины конуса режущей головки поворотного резца; k_β – коэффициент, учитывающий влияние угла разворота резца между направлением скорости и проекции оси резца на плоскость резания; *A, B, E, K* и *L* – параметры, зависящие от геометрии и ориентации инструмента, а также свойств разрушаемого массива.

Ключевая особенность методики – сила подачи P_y определяется независимо от силы резания P_z через отдельную систему уравнений, учитывающую удельное давление на площадке затупления, напряжения сдвига в боковых плоскостях скола и угол скола Ω.

Сравнительный расчёт сил резания и подачи для острого и затупленного резца РС-14 по трём методикам (условия: сильвинит III горизонта 1СгРУ Старобинского месторождения, $\sigma_{сж}$ = 40,5 МПа, τ = 13,4 МПа, $A_р$ = 450 Н/мм, $h_{ср}$ = 1,5 см, t = 7 см) приведен в таблице 1.

Нагрузка на затупленном резце рассчитывалась при достижении длины площадки затупления 5 мм, т.к. при достижении этой длины резец РС-14 считается равномерно изношенным.

Таблица 1 – результаты расчётов нагрузки на резце по разным методикам

Методика	Вектора сил на остром резце		Вектора сил на затупленном резце	
	P_z, Н	P_y, Н	P_z, Н	P_y, Н
ОСТ 12.44.258-84 (угольная)	6309	7025	8626	12965
Отраслевая методика ВНИИГ	5522	4296	7419	5771
Методика из рнаботыСемёнова В.В.	5642	4175	7468	8144

Результаты расчётов показывают, что значения сил резания полученные по методикам [3, 4] являются близкими при заданных условиях

в отличие от ОСТ 12.44.258-84. Это связано с тем, что методики [3, 4] разрабатывались специально для расчёта нагрузки на привод проходческо-очистных машин, работающих в условиях калийных рудников. При этом значения сил подачи, рассчитанные по «солевым» методикам имеют большое различие при расчёте нагрузки на затупленном резце. В расчёте по методике [4] сила подачи при наличии площадки затупления длинной 5 мм становится больше силы резания, в то время как при расчёте по методике [3] также как и при расчёте на остром резце имеют значение 80% от силы резания. Рост силы подачи относительно силы резания подтверждается экспериментальными данными из работ [1, 2]. Определение сил резания и подачи по методике [4] интересно не только с точки зрения определения более точного значения суммарной нагрузки на резце, но и с точки зрения определения направления суммарного вектора силы, т.к. суммарный вектор силы отклоняется от оси резца приводя к сложно деформированному состоянию.

Сравнительный расчет показал, что угольный стандарт ОСТ 12.44.258-84 неприменим для условий калийных рудников, так как из-за игнорирования специфики соляного массива существенно завышает значения сил резания и подачи. Специализированные методики ВНИИГ и из работы В.В. Семенова дают близкие результаты при оценке силы резания острым инструментом, однако критически расходятся при расчете нагрузок на затупленном резце. Физически обоснованный рост силы подачи над силой резания P_z, P_y при износе резца учитывает только методика из работы В.В. Семенова, что подтверждается экспериментальными данными. Именно этот аналитический подход рекомендуется использовать для корректного моделирования пространственного вектора суммарной нагрузки и расчета сложно деформированного состояния элементов резца методом конечно-элементного анализа (МКЭ).

Список литературы

1. Семенов, В. В. Обоснование и выбор параметров исполнительных органов проходческо-очистных комбайнов нового поколения для добычи калийных руд / В. В. Семенов. – Тула : ТулГУ, 2011.

2. Старовойтов, В. С. Определение рациональных параметров и режимов разрушения калийных солей шнековыми исполнительными органами очистных комбайнов (на примере ПО «Беларуськалий») / В. С. Старовойтов. – Солигорск : ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с оОпытным производством», 2002.

3. Комбайны проходческо-очистные для добычи калийных руд. Выбор показателей назначения и расчёт параметров горных пород / В. Л. Пинский, С. А. Волков, Г. В. Лексина, [и др.]. – Ленинград, 1986.

4. Обоснование параметров и выбор резцов исполнительного органа проходческо-очистного комбайна для добычи калийных руд «Урал-61» / В. В. Семенов, И. Г. Шмакин, А. Б. Жабин, П. Н. Чеботарёв. – Текст : электронный // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – № 4. – С. 6-9. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-parametrov-i-vybor-reztsov-ispolnitelnogo-organa-prohodchesko-ochistnogo-kombayna-dlya-dobychi-kaliynyh-rud-ural-61 (дата обращения: 22.04.2026).