

УДК 622.232.7

**О.Е. Шабаев**, д-р техн. наук, проф.,  
**Н.В. Хиценко**, канд. техн. наук, доц., **И.И. Бридун**, аспирант  
Донецкий национальный технический университет, Украина  
Тел./Факс: +38 (062) 304-90-08, E-mail: [oeshabaev@yandex.ua](mailto:oeshabaev@yandex.ua)

## ФОРМИРОВАНИЕ УСИЛИЙ РЕЗАНИЯ НА РЕЗЦАХ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКОГО КОМБАЙНА С УЧЕТОМ ИХ ЗАТУПЛЕНИЯ

*Установлена возможность косвенной оценки степени износа режцового инструмента на основе обработки данных непрерывной регистрации тока двигателя привода исполнительного органа. Экспериментально установлена линейная регрессионная зависимость удельных энергозатрат за цикл обработки забоя от объема разрушенной горной массы. Предложены зависимости, позволяющие учесть влияние затупления поворотных режцов типа Р32-70 на формирование усилия резания в функции от объема разрушенного горного массива и его прочности. Обоснованы состояния режущего инструмента, которые должны учитываться при моделировании рабочего процесса разрушения горного массива исполнительным органом проходческого комбайна.*

**Ключевые слова:** проходческий комбайн, резец, износ, удельные энергозатраты, усилие резания, диагностика.

### 1. Введение

Важнейшим условием интенсификации горных работ является повышение темпов проведения подготовительных выработок. Это возможно лишь с применением проходческих комбайнов с высокими показателями безотказности и долговечности. Одной из наиболее нагруженных подсистем комбайна является трансмиссия привода исполнительного органа. Ее нагруженность формируется в результате действия системы сил резания горной породы на рабочем инструменте коронки. При разрушении забоя исполнительным органом проходческого комбайна происходит непрерывный износ режцов, который приводит к изменению их формы и конструктивных параметров, что ведет к росту удельных энергозатрат разрушения забоя. Несвоевременная замена изношенных режцов может привести к существенным отклонениям показателей технического уровня комбайна от нормативных значений согласно его технической характеристике. Поэтому необходимы исследования влияния износа режущего инструмента на основные показатели технического уровня – производительность и ресурс с целью выбора комплексного показателя степени износа режцов для обоснованного принятия решения о необходимости их замены.

Основы теории разрушения горных пород базируются на результатах многочисленных экспериментальных исследований, проведенных в ИГД им. А.А. Скочинского и ДонУГИ [1, 2]. На основе этих исследований предложены методики описания составляющих сил резания при разрушении углей и пород (например, [3]), которые позволяют учесть основные прочностные и хрупко-пластические свойства разрушаемого массива, его напряженное состояние, а также геометрию резца и режимные параметры разрушения. Эти методики используют зависимости, в которых влияние износа резца учитывается величиной проекции площадки затупления на плоскость резания. Вместе с тем, на поперечно-осевых коронках в основном применяются поворотные режцы, для которых понятие «площадка затупления» неоднозначно, что затрудняет использование рассмотренных методик.

Таким образом, целью настоящей статьи является разработка метода, позволяющего на основе косвенной оценки степени износа режцового инструмента учесть влияние затупления поворотных режцов на формирование усилия резания.

Для достижения поставленной цели были решены задачи:

1. Экспериментальная оценка изменения удельных энергозатрат разрушения забоя проходческим комбайном, обусловленного износом режцов, от объема разрушенной горной массы.

2. Разработка математической модели формирования усилия резания на одиночном режце с учетом его затупления.

3. Оценка возможных состояний режущего инструмента исполнительного органа проходческого комбайна с учетом особенностей конструкции коронки и схемы обработки забоя.

## 2. Удельные энергозатраты разрушения забоя комбайном

Удельные энергозатраты характеризуют эффективность процесса разрушения забоя с учетом физико-механических свойств разрушаемой породы, структуры забоя, конструкции и технического состояния исполнительного органа и режущего инструмента, а также режимных параметров (скорости подачи, резания, глубины зарубки и шага фрезерования исполнительного органа) и перебора породы по контуру выработки.

Исследования влияния степени затупленности режцов на удельные энергозатраты процесса разрушения забоя проводились в представительных условиях эксплуатации при прохождении комбайном КПД вентиляционного штрека северной коренной лавы, пласта I<sub>12</sub> АП «Шахта «Белицкая» ГП «Добропольеуголь» [4]. Коронки комбайна КПД были оснащены поворотными режцами Р32-70. На основе оригинальной методики обработки непрерывной записи тока двигателя привода резания [4] были получены удельные энергозатраты за каждый цикл обработки забоя. На рис. 1 приведены диаграмма изменения средних за цикл обработки забоя удельных энергозатрат (50 циклов, 5 суток работы). Среднее значение составляло  $(4,68 \pm 0,61)$  кВтч/м<sup>3</sup>, а диапазон возможных значений с доверительной вероятностью 0,95 – от 2,29 кВтч/м<sup>3</sup> до 7,03 кВтч/м<sup>3</sup>. Так как в процессе проведения эксперимента горно-геологические условия изменялись незначительно, колебания удельных энергозатрат вызваны переборами и случайным характером воспроизведения цикла обработки забоя машинистом комбайна, а также износом и поломками режущего инструмента.

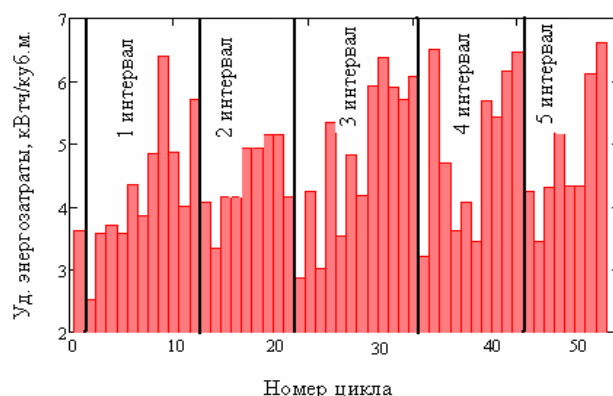


Рис. 1. Изменение средних за цикл обработки забоя удельных энергозатрат в ходе эксперимента

Для определения влияния износа рабочего инструмента на изменение величины удельных энергозатрат диаграмма была разбита на интервалы. Начало каждого интер-

вала соответствовало началу первой рабочей смены, следующей после ремонтной, в которой осуществлялась замена резцов. Заканчивался анализируемый интервал сменой, предшествующей очередной ремонтной.

В качестве примера на рис 2 приведена диаграмма изменения удельных энергозатрат за период между ремонтными сменами, соответствующий первому интервалу.

Для каждого интервала получена линейная регрессионная зависимость удельных энергозатрат от объема разрушаемой горной массы. При этом уравнение регрессии имеет вид:

$$W = W_0 + K_V \cdot V, \quad (1)$$

где  $W_0, K_V$  - коэффициенты регрессии;  $V$  - объем разрушаемой горной массы,  $м^3$ .

Коэффициенты регрессии определялись методом наименьших квадратов с использованием программного обеспечения Excel.

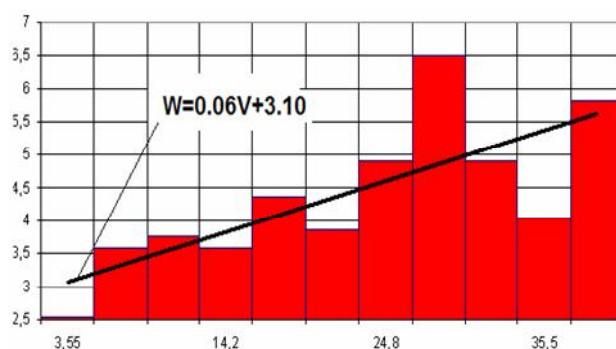


Рис. 2. Изменение удельных энергозатрат за период между ремонтными сменами (интервал 1)

Средние значения полученных в результате обработки экспериментальных данных коэффициентов регрессии составляли  $K_V = (0,061 \pm 0,008) кВтч/м^6$ ;  $W_0 = (3,49 \pm 0,13) кВтч/м^3$ , а диапазон возможных значений с доверительной вероятностью 0,95, соответственно – для  $K_V$  от  $0,028 кВтч/м^6$  до  $0,073 кВтч/м^6$  и для  $W_0$  от  $2,98 кВтч/м^3$  до  $3,82 кВтч/м^3$ . Физический смысл коэффициентов регрессии:  $W_0$  - удельные энергозатраты за цикл обработки забоя после замены рабочего инструмента в ремонтную смену (острые резцы);  $K_V$  - коэффициент, учитывающий рост удельных энергозатрат за цикл обработки забоя по мере изнашивания резцов пропорционально объему разрушенного массива. Величина коэффициента  $K_V$  зависит в первую очередь от физико-механических свойств (абразивности) забоя и износостойкости рабочего инструмента.

Анализ рис. 1 и рис. 2 показывает, что после замены рабочего инструмента во время ремонтной смены удельные энергозатраты резко падают, а затем по мере затупления рабочего инструмента в течение рабочих смен возрастают не менее чем на 20%.

### 3. Моделирование износа отдельного резца

В проектировочных и эксплуатационных расчетах проходческой техники для обоснованного учета износа резцов используется понятие «нормально затупленный резец» и в формулы расчета усилий на резце вводится величина проекции площадки затупления резца на плоскость резания. Для радиальных и тангенциальных неповоротных

резцов эта величина может быть достаточно просто оценена при визуальном осмотре задней грани головки резца и составляет для различных типов резцов от 20 до 50 мм<sup>2</sup>. Таким образом, решение о замене изношенного резца может быть принято на основе визуального осмотра исполнительного органа. Вместе с тем, практически вся современная проходческая техника оснащается тангенциальными поворотными резцами. Эти резцы не имеют ни передней, ни задней грани в силу конструктивных особенностей (биконическая головка резца) и постепенного вращения в процессе разрушения забоя. Вращение предусмотрено для компенсации износа керна резца, однако на практике часть резцов не вращаются из-за дефектов изготовления, деформаций и коррозии контактирующих поверхностей. Износ поворотных резцов происходит неравномерно – керн изнашивается медленнее, головка – быстрее. В результате степень износа поворотного резца значительно труднее оценить при визуальном осмотре, а понятие «площадка затупления» вообще не имеет физического смысла. Кроме того, одинаково изношенные резцы, находящиеся в различных линиях резания, оказывают различное влияние на формирование нагруженности исполнительного органа и энергозатраты разрушения забоя.

Износ резцов приводит к изменению ряда их геометрических параметров, что ведет к изменению усилия резания. Как известно, величина износа пропорциональна работе сил трения для  $i$ -го резца и при неизменном на длине реза  $\Delta l_i$  среднем усилии подачи  $P_{yi}$  может быть представлена как

$$\Delta m_i = k_a a P_{yi} \Delta l_i \quad (2)$$

где  $k_a$  - коэффициент пропорциональности;  $a$  - абразивность породы.

Учитывая корреляцию между усилиями резания и подачи, а также приближенно принимая усилие резания  $P_{zi} \approx k_z p_k S_i$  (здесь  $k_z$  - коэффициент пропорциональности), зависимость (2) можно представить в виде

$$\Delta m_i = k_a k_z a p_k \Delta V_i, \quad (3)$$

где  $\Delta V_i = S_i \Delta l_i$  - объем породы, разрушаемый  $i$ -тым резцом, соответствующий длине реза  $\Delta l_i$ .

Однако, использовать приведенную зависимость в практических расчетах затруднительно ввиду отсутствия связи между  $\Delta m_i$  и изменением усилий на резце.

Как показали приведенные выше результаты экспериментальных исследований, удельные энергозатраты существенно возрастают пропорционально объему разрушаемой породы. Этой же величине, согласно зависимости (3), пропорциональна степень износа резца. Исходя из этого, для отдельного резца также можно предположить линейный рост среднего значения усилия резания согласно зависимости:

$$P_{zi} = P_{zoi} (1 + k_V \cdot V_i), \quad (4)$$

где  $P_{zoi}$  - усилие на незатупленном  $i$ -том резце при заданных параметрах среза;  $k_V$  - коэффициент, учитывающий рост усилия резания;  $V_i$  - объем породы, разрушенный  $i$ -тым резцом с момента его замены.

Средние значения усилий резания и подачи на остром  $i$ -том резце рассчитываются в соответствии с [3]. Случайная составляющая усилия на резце учитывается согласно рекомендациям работы [5].

Значения экспериментально установленных коэффициентов  $W_0$  и  $K_V$  могут быть использованы для расчета коэффициента  $k_V$ , учитывающего рост усилия резания при затуплении резца, разрушающего породу контактной прочностью  $p_K$ :

$$k_V = \frac{K_V}{W_0} \cdot \frac{p_K}{p_{K0}}, \quad (5)$$

где  $p_{K0}$  - средневзвешенная контактная прочность пород забоя в условиях проведения эксперимента (для условий описанного выше эксперимента  $p_{K0}=320$  МПа).

#### **4. Распределение объема разрушенной исполнительным органом породы между резцами**

Для проведения исследований была использована разработанная в работе [6] математическая модель рабочего процесса проходческого комбайна КПД, учитывающая износ режущего инструмента в зависимости от объема разрушенной породы согласно зависимостям (4, 5).

Известно, что в различных режимах разрушения забоя на резцах поперечно-осевой коронки формируются существенно различные параметры среза. В результате объемы породы, разрушаемые отдельными резцами, могут существенно отличаться. В качестве примера на рис. 3 приведены гистограммы распределения объема породы, разрушаемого исполнительным органом в режимах бокового (рис. 3, а) и вертикального (рис. 3, б) резов между резцами, установленными в различных линиях резания. Гистограммы построены при наиболее характерных при обработке породного забоя с временным сопротивлением пород 40-80 МПа параметрах режима разрушения забоя: глубина зарубки  $B = 0,2$  м, шаг фрезерования  $\Delta H = 0,4$  м.

Анализ гистограмм показывает, что в зависимости от режима разрушения забоя различные резцы отделяют от массива существенно отличающиеся объемы породы, что приводит к неравномерному изнашиванию режущего инструмента. Так, в режиме бокового реза наиболее наиболее нагружены резцы в 6-8 линиях резания (разрушают суммарно 70% породы). С другой стороны, в режиме вертикального реза нагруженность резцов перераспределяется в сравнении с боковым резом, резцы нагружены более равномерно – максимальная доля на 1 резец до 10-15% вместо 20-30%.

Цикл обработки забоя включает различные режимы, что необходимо учитывать при анализе влияния износа резцов на показатели рабочего процесса комбайна. На рис. 4, в приведено суммарное распределение объема породы между резцами, установленными на коронках исполнительного органа, за цикл обработки забоя для выработки сечением  $13$  м<sup>2</sup>. Распределение рассчитано для одной из 2х коронок (сумма всех долей по линиям резания составляет 50%). Анализ суммарного распределения показал, что неравномерность нагруженности резцов усилилась. Так, резцы, установленные в 7й линии резания, разрушают в 2 раза больший объем породы по сравнению со средним по всем резцам коронки значением. Соответственно, резцы в 7й линии резания будут в 2 раза быстрее изнашиваться, что необходимо учесть при исследованиях. Отдельным перспективным направлением, выходящим за пределы данной работы, является оптимизация параметров коронок по критерию равномерного износа режущего инструмента.

На основании вышеизложенного, при исследовании влияния износа резцов на формирование удельных энергозатрат следует рассмотреть следующие случаи состояния резцов коронки:

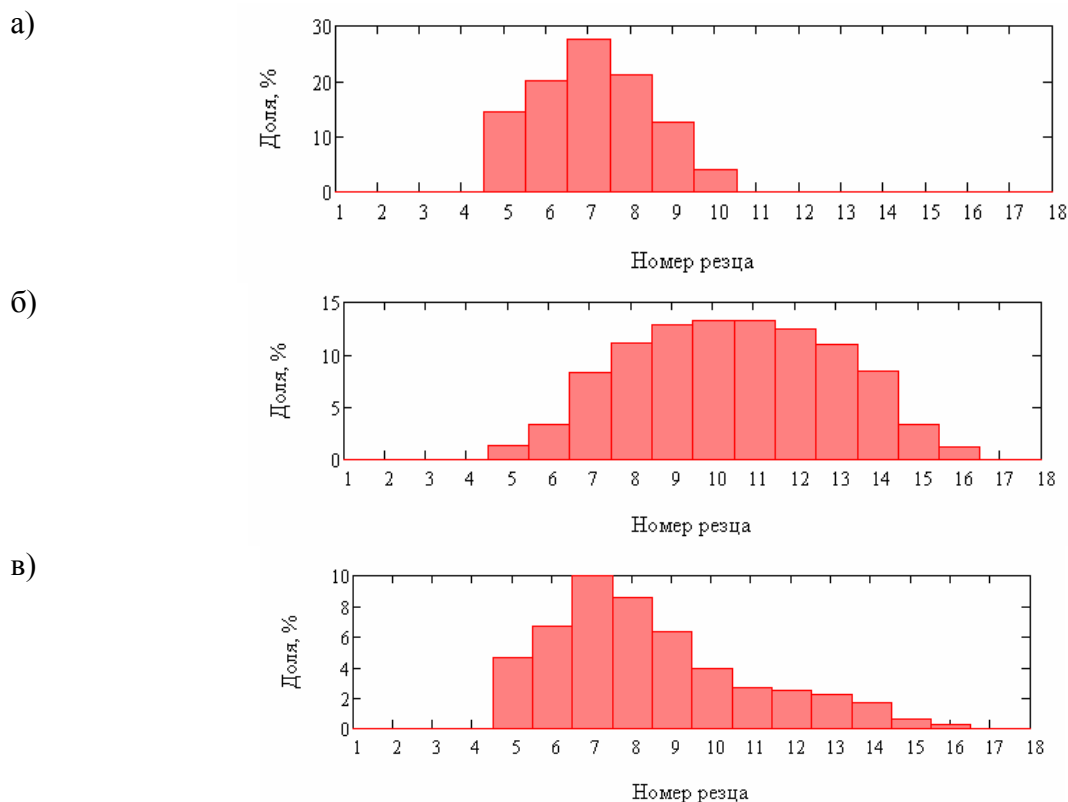


Рис. 4. Гистограммы распределения разрушаемого исполнительным органом объема породы между резцами в режимах бокового (а), вертикального (б) резов, а также суммарная за цикл обработки забоя (в)

1) все резцы острые, что соответствует началу работы комбайна после замены всех резцов. Это состояние следует принять как базовое для сравнительной оценки;

2) резцы затуплены пропорционально средневзвешенным долям отделяемой от массива породы за цикл обработки забоя («пропорциональный износ»). При этом следует рассмотреть различные суммарные объемы породы, разрушенной исполнительным органом. Это состояние возможно при одновременной замене всех резцов на коронках;

3) резцы затуплены одинаково («равномерный износ»). При этом также принимаются различные суммарные объемы породы, разрушенной исполнительным органом, однако считается, что они делятся между контактирующими резцами в равных долях. Это состояние может быть рассмотрено как усредненное для случая замены резцов по мере затупления. Степень затупления резцов на коронке не зависит от распределения разрушаемого объема породы между резцами.

### 5. Заключение

1. Установлена возможность косвенной оценки степени износа резцового инструмента на основе обработки данных непрерывной регистрации тока двигателя привода исполнительного органа. Экспериментально, в условиях проходки комбайном КПД вентиляционного штрека северной коренной лавы пласта 112 АП «Шахта «Белицкая» ГП «Добропольеуголь», установлена линейная регрессионная зависимость удельных энергозатрат за цикл обработки забоя от объема разрушенной горной массы. При этом прирост удельных энергозатрат, обусловленный затуплением рабочего инструмента, между его заменами составляет не менее чем 20%.

2. Предложены метод и зависимости, позволяющие учесть влияние затупления поворотных резцов типа Р32-70 на формирование усилия резания в функции от объема разрушенного горного массива и его контактной прочности. При моделировании рабо-

чего процесса разрушения горного массива исполнительным органом проходческого комбайна необходимо рассматривать два состояния режущего инструмента, существенно влияющие на эффективность разрушения: резцы затуплены одинаково и резцы затуплены пропорционально объемам отделяемой от массива породы за цикл обработки забоя.

#### **Список литературы:**

1. Позин Е.З. Сопротивляемость углей разрушению режущими инструментами / Е.З. Позин; Отв. ред. А. И. Берон. – М.: Наука, 1972. – 240 с.
2. Разрушение горных пород проходческими комбайнами. Разрушение тангенциальными инструментами / Отв. ред. Л.И. Барон. - М., Наука, 1973. – 171 с.
3. Комбайны проходческие со стреловидным исполнительным органом. Расчет эксплуатационной нагруженности трансмиссии исполнительного органа: ОСТ 12.44.197–81. - [Введен с 01.07.1982]. – М.: Минуглепром СССР, 1981. – 48 с.
4. Экспериментальные исследования режимов работы исполнительного органа проходческого комбайна / О.Е. Шабаев, А.К. Семенченко, Н.В. Хиценко, Н.И. Стадник // Горное оборудование и электромеханика. – 2010. – №10. – С. 49 – 56.
5. Кондрахин В.П. Имитационное моделирование процесса формирования нагрузок на резцах при резании горных пород / В.П. Кондрахин, А.И. Осипенко // Наукові праці ДонДТУ. Серія гірничо-електромеханічна. – 2000. – Вып27. – С. 161–168.
6. Математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на аксиальной коронке мехатронного проходческого комбайна / А.К. Семенченко, О.Е. Шабаев, Н.В. Хиценко, Е.Ю. Степаненко // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Серія гірничо-електромеханічна. – 2010. – Вип. 18(172). – С. 3-12.

Надійшла до редакції 15.02.2014

**О.Є. Шабаєв, М.В. Хіценко, І.І. Бридун**

#### **ФОРМУВАННЯ ЗУСИЛЬ РІЗАННЯ НА РІЗЦЯХ ВИКОНАВЧОГО ОРГАНУ ПРОХІДНИЦЬКОГО КОМБАЙНА З УРАХУВАННЯМ ЇХ ЗАТУПЛЕННЯ**

*Встановлено можливість непрямої оцінки ступеня зносу різцевого інструменту на основі обробки даних безперервної реєстрації струму двигуна приводу виконавчого органу. Експериментально встановлена лінійна регресійна залежність питомих енерговитрат за цикл обробки вибою від об'єму зруйнованої гірської маси. Запропоновано залежності, що дозволяють врахувати вплив затуплення поворотних різців типу Р32-70 на формування зусилля різання у функції від об'єму зруйнованого гірського масиву і його міцності. Обґрунтовано стани різального інструменту, які повинні враховуватися при моделюванні робочого процесу руйнування гірського масиву виконавчим органом прохідницького комбайна.*

**Ключеві слова:** *прохідницький комбайн, різець, знос, питомі енерговитрати, зусилля різання, діагностика.*

**O. Ye. Shabayev, N.V. Khitsenko, I.I. Bridun**

#### **FORMATION OF CUTTING FORCES ON THE TOOLS OF HEADING MACHINE'S CUTTING UNIT CONSIDERING THEIR BLUNTING**

*There is a possibility of indirect estimation of the wear degree of cutting tools based on continuous registration of the current of the drive motor of a cutting unit. We obtained experimentally a linear regression dependence of specific energy consumption per machining operation on the volume of broken rock. We propose dependences allowing taking into account the effect of blunting of the rotary cutting tools R32-70 on the formation of cutting forces as a function of volume and strength of broken rock. We considered the conditions of cutting tools, which should be considered during simulation of destruction of rock mass by the cutting unit of the heading machine.*

**Key words:** *heading machine, cutter, wear, specific energy consumption, cutting force, diagnostics.*