

УДК 622.232

**О.Е. Шабает** (д-р техн. наук, проф.),  
**Н.В. Хиценко** (канд. техн. наук, доц.),  
**И.И. Бридун** (аспирант)

ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ЗАБОЯ ПРОХОДЧЕСКИМ КОМБАЙНОМ С УЧЕТОМ ОТКАЗОВ РАБОЧЕГО ИНСТРУМЕНТА**

*Разработана математическая модель процесса разрушения забоя проходческим комбайном, учитывающая изнашивание и возможность поломки резцов в процессе работы. На основе натурного эксперимента установлена адекватность разработанной модели. Модель может быть использована для разработки средств и методик косвенной диагностики технического состояния режущего инструмента без остановки комбайна и обоснования эффективной стратегии замены изношенного инструмента.*

**Ключевые слова:** проходческий комбайн, резец, износ, отказ, математическая модель, функционально-законченный элемент.

***Проблема и ее связь с научными или практическими задачами.***

Необходимым условием реализации возможностей современной добычной техники является обеспечение необходимого фронта работ, то есть своевременная проходка подготовительных выработок. Наиболее перспективным является способ проведения подготовительных выработок с применением проходческих комбайнов, оснащенных исполнительными органами избирательного действия с резцовым рабочим инструментом. Известно, что состояние рабочего инструмента существенно влияет на эффективность процесса разрушения забоя и как следствие, на реализацию потенциальных возможностей этой техники. Существующие методики технической диагностики состояния рабочего инструмента основаны на визуальном осмотре и непосредственных замерах его геометрических размеров, что требует обязательной остановки комбайна. Вместе с тем, при необходимости интенсификации работ частые остановки проходческого оборудования недопустимы. Кроме того, величина допустимого износа рабочего инструмента зависит от свойств разрушаемых пород и не может быть установлена без мониторинга основных показателей рабочего процесса. Поэтому актуальной проблемой является разработка средств

технической диагностики состояния рабочего инструмента на основе непрерывной регистрации показателей рабочего процесса без остановки комбайна.

### ***Анализ исследований и публикаций.***

Разработка средств диагностики технического состояния рабочего инструмента исполнительного органа требует обоснования диагностируемых параметров и их предельных состояний [1]. При этом наиболее эффективным инструментом анализа является метод математического моделирования. Современное состояние науки о горных машинах рассматривает задачу диагностики технического состояния как один из аспектов работы системы интеллекта мехатронной горной машины [2, 3]. Разработано математическое обеспечение анализа рабочих процессов мехатронных горных машин, выполнена систематизация математических моделей рабочих процессов отдельных мехатронных функционально законченных элементов (ФЗЭ), проработаны вопросы их объединения в единую математическую модель [4, 5]. Вместе с тем, для проходческого комбайна как мехатронной системы в настоящее время нет ММ, достаточно полно описывающей его рабочий процесс с учетом таких отказов рабочего инструмента как внезапная поломка и постепенный износ.

### ***Постановка задачи.***

Необходима разработка адекватной математической модели рабочего процесса проходческого комбайна как мехатронного объекта с учетом отказов рабочего инструмента.

### ***Изложение материала и результаты.***

Резцовый исполнительный орган является частью динамической системы проходческого комбайна, приводится в движение подсистемами привода и подачи и обеспечивает разрушение горного массива. В процессе разрушения массива на исполнительном органе формируется вектор внешнего возмущения, характер которого существенно определяется наличием обратных связей по перемещениям и скоростям подачи и резания. Характер и величина вектора внешнего возмущения определяет силовую и энергетическую нагруженность основных подсистем комбайна, напрямую связанную с эффективностью его функционирования. Поэтому для корректного моделирования рабочего процесса теоретические исследования должны выполняться с учетом закономерностей формирования рабочих режимов силовых систем, которые участвуют в процессе разрушения массива – систе-

мы привода, подвески и перемещения (гидропривод) исполнительного органа.

Разрушаемый горный массив, как правило, имеет сложную структуру, представленную несколькими пластами с различными физико-механическими свойствами. Для корректного учета этого фактора следует задать минимум 3 пласта с достаточно представительным разбросом прочностных характеристик [6].

При разрушении забоя для исполнительного органа с поперечно-осевыми коронками можно выделить режимы фронтальной и вертикальной зарубок, бокового реза. Нагруженность исполнительного органа в этих режимах существенно отличается, что должно учитываться при исследованиях долговечности элементов его конструкции при формировании диаграммы нагружения за цикл обработки забоя.

Таким образом, в качестве основы для разработки ММ может быть принята модель, предложенная в работе [5]. Модель должна быть усовершенствована и обеспечить возможность теоретического описания рабочего процесса при постепенном износе и внезапных поломках режущего инструмента. При этом следует принять допущение, что износ резцов протекает равномерно пропорционально объему разрушенной породы [7].

#### ***Математическая модель рабочего процесса проходческого комбайна.***

Разработанное в [5] математическое обеспечение анализа рабочих процессов горной выемочной машины как мехатронного объекта позволяет на основе компоновки различных функционально законченных элементов (ФЗЭ) конструкции формировать ММ процессов функционирования горных выемочных машин различных конструкций. Для выполнения исследований по выявлению влияния технического состояния коронки на показатели эффективности комбайна была разработана ММ процесса разрушения забоя проходческим комбайном стреловидного типа с поперечно-осевыми коронками [5] на базе его структурной схемы, приведенной на рисунке 1. В структуре комбайна выделены подсистемы: металлоконструкции и привода резания (а), управления (б) и гидропривода подачи (в). Первая подсистема включает мехатронные ФЗЭ типа «пространственно перемещающаяся масса»: корпус комбайна М1, турель М2, стрела М3 и редуктор исполнительного органа М4. Кинематика движения редуктора исполнительного органа в пространстве характеризуются вектором  $\bar{\mu}_{M4}$  показаний интегрированных датчиков положения ( $\bar{r}_k$ ). Эти по-

казания могут быть использованы системой управления для оценки производительности разрушения забоя комбайном и точности обработки функциональных движений исполнительного органа.

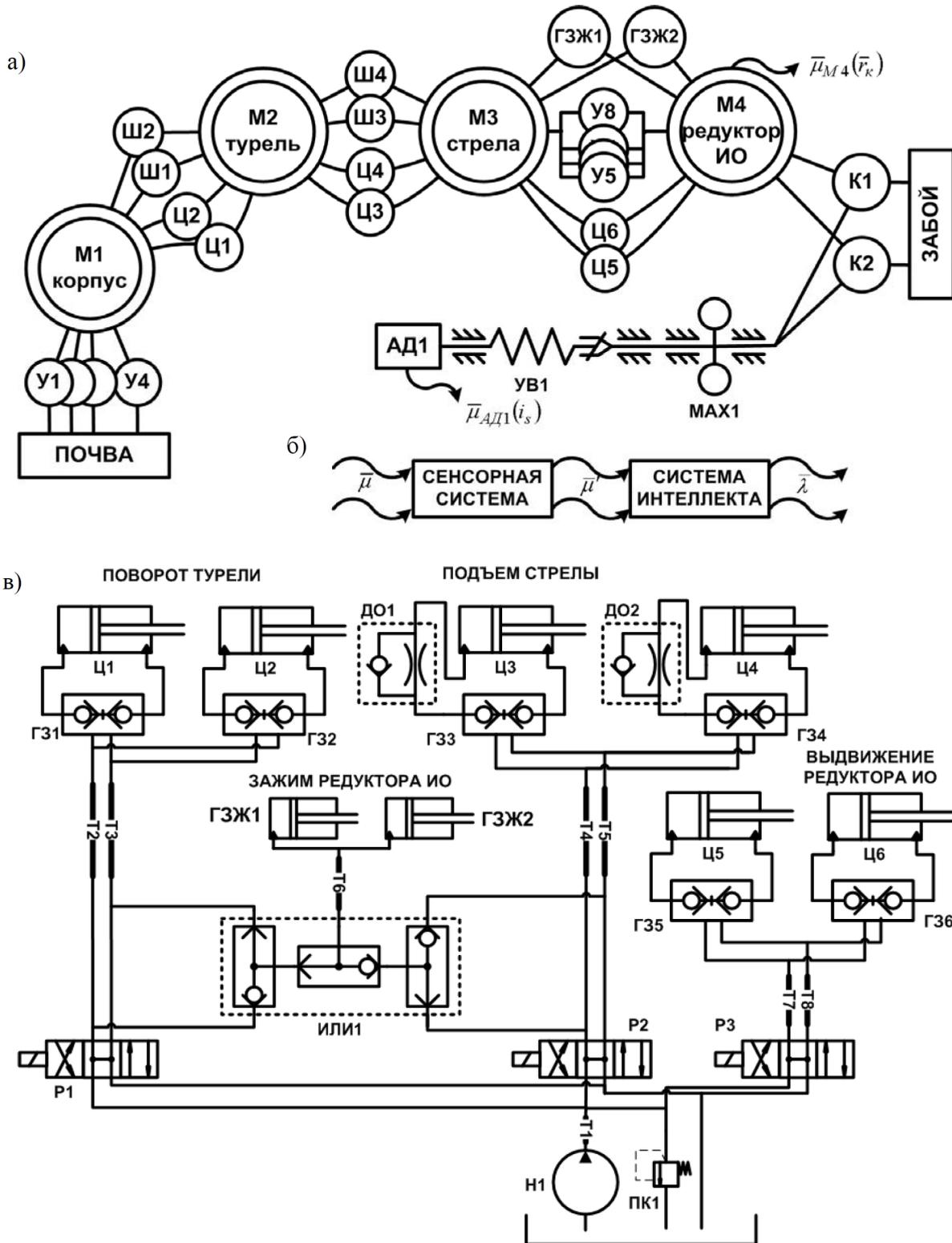


Рис. 1 - Структурная схема проходческого комбайна

Корпус М1 на почве выработки установлен на четырех упорах У1..У4 по углам жесткой базы. Турель М2 закреплена на корпусе в цилиндрических шарнирах Ш1 (верхний) и Ш2 (нижний), обеспечивающих возможность поворота стрелы с помощью гидроцилиндров Ц1 (левый) и Ц2 (правый). Стрела М3 закреплена на турели М2 в цилиндрических шарнирах Ш3 (левый) и Ш4 (правый), обеспечивающих возможность подъема исполнительного органа с помощью гидроцилиндров Ц3 (левый) и Ц4 (правый). На стреле М3 в клиновидных направляющих, поверхность которых задается упорами У5-У8 и гидрозажимами ГЗЖ1 и ГЗЖ2, установлен редуктор исполнительного органа М4. Выдвижение редуктора М4 обеспечивается гидроцилиндрами Ц5 и Ц6. На редукторе М4 установлены две поперечно-осевые коронки К1 и К2.

Расчетная схема подсистемы привода резания исполнительного органа представляет собой совокупность асинхронного электродвигателя АД1, упругого вала УВ1 и маховика МАХ1, к которому приведены моменты инерции коронок и вращающихся частей редуктора исполнительного органа. Рабочий процесс системы привода резания характеризуется показаниями датчика тока двигателя  $i_S$ . Эта информация может быть использована системой управления для оценки эффективности разрушения забоя и оценки режима работы двигателя.

Расчетная схема подсистемы гидропривода подачи исполнительного органа включает насос Н1, от которого рабочая жидкость через распределители Р1-Р3 по трубопроводам Т1-Т8 подается в рабочие полости гидроцилиндров Ц1-Ц6 и гидрозажимов ГЗЖ1 и ГЗЖ2. Также в расчетную схему включены гидрозамки ГЗ1-ГЗ6, предохранительный клапан ПК1, односторонние дроссели ОД1, ОД2, блок клапанов «или» ИЛИ1.

Подсистема управления комбайна включает в себя два ФЗЭ - «сенсорная система» и «система интеллекта». Первый осуществляет первичную обработку показаний интегрированных датчиков  $\bar{\mu}_1$  с формированием вектора обработанных сигналов  $\bar{\mu}_2$ . На основании этих данных ФЗЭ «система интеллекта» вырабатывает вектор  $\bar{\lambda}$ , содержащий информацию для оператора о техническом состоянии режущего исполнительного органа и рекомендуемых системой интеллекта сроках устранения отказов.

Таким образом, ММ процесса разрушения забоя проходческим комбайном может быть записана:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 f_M(\bar{X}_{Mi}, \bar{Y}_{Mi}, \bar{P}_{Mi}, \bar{\mu}_{M4}) = 0; \quad i = \overline{1,4}; \\
 f_{Ц}(\bar{X}_{Цj1}, \bar{Y}_{Цj1}, \bar{P}_{Цj1}) = 0; \quad j1 = \overline{1,6}; \\
 f_{ГЗЖ}(\bar{X}_{ГЗЖj2}, \bar{Y}_{ГЗЖj2}, \bar{P}_{ГЗЖj2}) = 0; \quad j2 = \overline{1,2}; \\
 f_{Ш}(\bar{X}_{Шj3}, \bar{Y}_{Шj3}, \bar{P}_{Шj3}) = 0; \quad j3 = \overline{1,4}; \\
 f_{У}(\bar{X}_{Уj4}, \bar{Y}_{Уj4}, \bar{P}_{Уj4}) = 0; \quad j4 = \overline{1,8}; \\
 \bar{Y}_{Кj5} = f(\bar{X}_{Кj5}, \bar{P}_{Кj5}); \quad j5 = \overline{1,2}; \\
 f_{АД}(\bar{X}_{АД1}, \bar{Y}_{АД1}, \bar{P}_{АД1}, \bar{\mu}_{АД1}) = 0; \\
 \bar{Y}_{УВ1} = f_{УВ}(\bar{X}_{УВ1}, \bar{P}_{УВ1}); \\
 f_{МАХ}(\bar{X}_{МАХ1}, \bar{Y}_{МАХ1}, \bar{P}_{МАХ1}) = 0; \\
 \bar{Y}_{Н1} = f_H(\bar{X}_{Н1}, \bar{P}_{Н1}); \\
 f_{ПК}(\bar{X}_{ПК1}, \bar{Y}_{ПК1}, \bar{P}_{ПК1}) = 0; \\
 f_T(\bar{X}_{Тl6}, \bar{Y}_{Тl6}, \bar{P}_{Тl6}) = 0; \quad l6 = \overline{1,8}; \\
 f_{ГЗ}(\bar{X}_{ГЗl7}, \bar{Y}_{ГЗl7}, \bar{P}_{ГЗl7}) = 0; \quad l7 = \overline{1,6}; \\
 f_P(\bar{X}_{Pl8}, \bar{Y}_{Pl8}, \bar{P}_{Pl8}, \bar{\lambda}_{Pl8}) = 0; \quad l8 = \overline{1,3}; \\
 f_{ИЛИ}(\bar{X}_{ИЛИ1}, \bar{Y}_{ИЛИ1}, \bar{P}_{ИЛИ1}) = 0; \\
 f_{ДО}(\bar{X}_{ДОl9}, \bar{Y}_{ДОl9}, \bar{P}_{ДОl9}) = 0; \quad l9 = \overline{1,2}; \\
 \bar{\mu}' = f_{СС}(\bar{\mu}\{\bar{\mu}_{M4}, \bar{\mu}_{АД1}\}, \bar{P}_{СС}); \\
 \bar{\lambda} = f_{СИ}(\bar{\mu}', \bar{P}_{СИ}); \\
 \bar{\varphi}(\bar{X}_{Nm}, \bar{Y}_{Nm}) = 0,
 \end{array} \right.$$

где  $f_N(\ )$  – вектор-функция, задающая математическое описание ФЗЭ  $N$ -го типа ( $N = "M", "Ц", \dots$ );

$\bar{X}_{Nm}, \bar{Y}_{Nm}, \bar{P}_{Nm}$  – соответственно векторы входных, выходных величин и вектор параметров для  $m$ -го ФЗЭ  $N$ -го типа;

$\bar{\varphi}(\ )$  – вектор-функция, задающая связи входов и выходов отдельных ФЗЭ в комплексной ММ.

Математическая модель содержит 61 взаимоувязанные по входам и выходам частные ММ ФЗЭ 19 типов, из которых 6 – элементы металлоконструкции (пространственно перемещающаяся масса – ин-

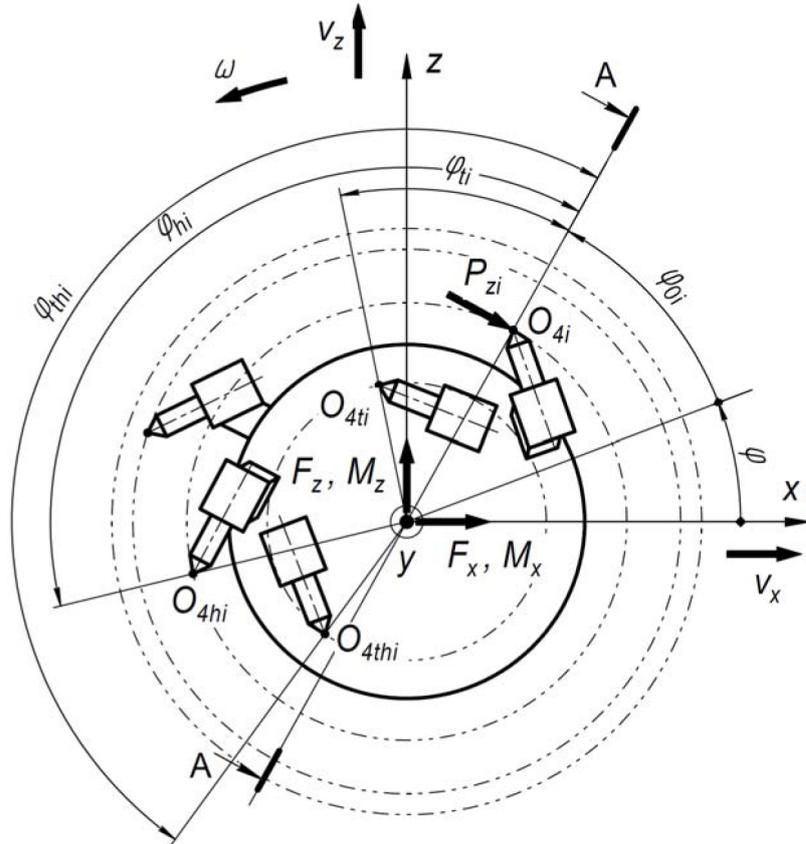
декс «М», гидроцилиндр – «Ц», гидрозажим – «ГЗЖ», цилиндрический шарнир – «Ш», упор – «У», поперечно-осевая коронка – «К»); 1 – элементы электропривода (асинхронный электродвигатель – «АД»); 2 – элементы трансмиссии (упругий вал – «УВ», маховик – «МАХ»); 7 – элементы гидропривода (насос – «Н», предохранительный клапан – «ПК», трубопровод – «Т», гидрозамок – «ГЗ», гидрораспределитель – «Р», блок клапанов «или» - «ИЛИ», односторонний дроссель – «ДО»); 2 – элементы системы управления (сенсорная система – «СС», система интеллекта – «СИ»).

**Математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на исполнительном органе.** В качестве исходной принята ММ формирования вектора внешнего возмущения в составе ММ динамики проходческих комбайнов [8]. Коронка присоединяется к инерционным элементам: пространственно перемещающейся массе (ППМ) и маховику. Таким образом, при расчете вектора внешнего возмущения учитывается сложное пространственное движение корпуса редуктора исполнительного органа и колебания скорости вращения коронки.

Резцовый исполнительный орган разрушает забой резцами в определенной последовательности, в результате чего образуется схема стружкообразования, определяющая параметры среза – толщину стружки  $h_i$  и шаг резания  $t_i$  – на каждом резце, контактирующем с забоем. Для их определения необходимо знать траектории движения резцов, образующих забой для рассматриваемого  $i$ -го резца (всего  $n_p$  резцов на коронке). Расчетная схема для определения параметров стружкообразования приведена на рис. 2, а, б. На схеме показан вид с торца на поперечно-осевую коронку.

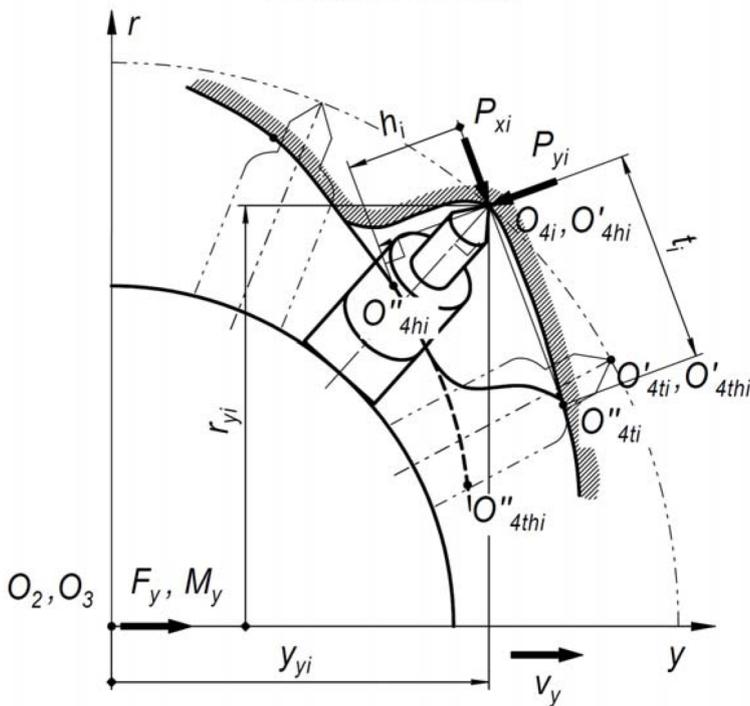
Параметры схемы набора описывают геометрию коронки и содержат следующую информацию для каждого  $i$ -го резца:  $\varphi_{0i}$  – угол установки  $i$ -го резца на коронке, рад;  $y_{yi}$ ,  $r_{yi}$  – расстояния от вершины  $i$ -го резца до оси вращения и до торца коронки;  $i_{ti}$  – номер резца, расположенного для  $i$ -го резца в соседней линии резания и минимально опережающего его при разрушении забоя;  $i_{hi}$  – номер резца, расположенного в линии резания  $i$ -го резца и минимально опережающего его при разрушении забоя;  $i_{thi}$  – номер резца, расположенного в линии резания резца  $i_{ti}$  и минимально опережающего его при разрушении забоя.

а)

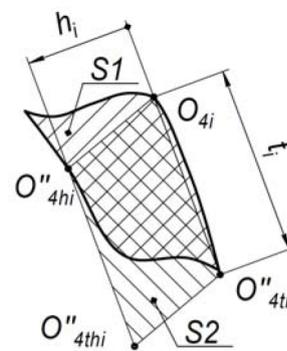


б)

A-A (увеличено)



в)



г)

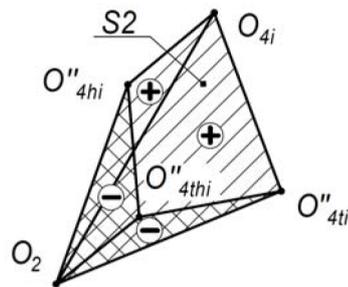


Рис. 2 - Формирование параметров среза на резце поперечно-осевой коронки

Для расчета параметров стружкообразования для резца с вершиной в точке  $O_{4i}$  необходимо рассмотреть траектории движения резцов с вершинами в точках  $O_{4hi}$ ,  $O_{4ti}$ ,  $O_{4thi}$ , которые образуют поверхность забоя для рассматриваемого резца и находятся в той же ( $O_{4hi}$ ) и соседней ( $O_{4ti}$ ,  $O_{4thi}$ ) линиях резания. Для расчета параметров среза задается плоскость А-А, жестко связанная с забоем и в рассматриваемый момент времени проходящая через ось вращения коронки и вершину резца  $O_{4i}$ . Последовательность по времени прохода резцов через плоскость А-А следующая:  $O_{4thi}$ ,  $O_{4hi}$ ,  $O_{4ti}$ ,  $O_{4i}$ . При вращении коронки без подачи вершины указанных резцов пройдут через плоскость А-А в точках  $O'_{4thi}$ ,  $O'_{4hi}$ ,  $O'_{4ti}$ . С учетом подачи коронки на забой с проекциями скорости  $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$  вершины резцов будут в точках  $O''_{4thi}$ ,  $O''_{4hi}$ ,  $O''_{4ti}$ . С учетом этого для резца  $O_{4i}$  площадь среза  $S_1$  (см. рис. 2, в). Ее вычисление требует задания хрупко-пластических свойств породы (угла развала борозды). Значительно проще расчет площади четырехугольника  $O''_{4thi} O''_{4hi} O''_{4ti} O_{4i}$ . Выполненная авторами оценка показала, что для коронок современных проходческих комбайнов разница между значениями  $S_1$  и  $S_2$  составляет менее 10%. Поэтому площадь среза может быть рассчитана методами векторной геометрии как разность площадей треугольников (см. рис. 2, г):

$$S_i = S_{\Delta O_2 O''_{4hi} O_{4i}} + S_{\Delta O_2 O''_{4ti} O_{4i}} - S_{\Delta O_2 O''_{4thi} O''_{4ti}} - S_{\Delta O_2 O''_{4hi} O''_{4thi}}.$$

Таким образом, параметры стружкообразования определяются: шаг резания  $t_i$  – как расстояние между точками  $O_{4i}$  и  $O''_{4ti}$ , а толщина среза – по формуле  $h_i = S_i / t_i$ .

Отличительной особенностью разработанной модели является алгоритм расчета толщины среза через шаг резания и площадь среза, который позволяет исключить некоторую неточность разработанных ранее моделей при оценке объемов породы, отделяемых резцами в процессе разрушения забоя.

#### *Задание усилий на резцах с учетом затупления в процессе работы*

Известные методики расчета составляющих усилия резания на одиночном резце [9, 10] 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 резцы, для которых понятие «площадка затупления» неоднозначно. Износ этих резцов приводит к изменению ряда их геометрических параметров, что ведет к изменению усилия резания. Как показали экспериментальные исследования, выполненные авторами для поперечно-осевой коронки проходческого комбайна КПД, оснащенной резцами типа Р32-70, удельные энергозатраты существенно возрастают (не менее 20% за сутки работы) пропорционально объему разрушаемой породы. Исходя из этого, для отдельного резца также можно предположить линейный рост среднего значения усилия резания согласно зависимости:

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

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.

Случайная составляющая усилия на резце учитывается согласно рекомендациям работы [11].

#### *Моделирование поломки резца.*

Для иллюстрации рассмотрим схему стружкообразования коронки конической формы (рис. 3, а). Последовательность разрушения забоя резцами коронки обозначена цифрами. При выходе из строя резца №5 сечение, которое должно быть разрушено резцом №6 увеличивается примерно в 2 раза (рис. 3, б). Вместе с тем, из-за нерационального соотношения толщины и шага среза весь объем породы, соответствующий сечению  $S_6$  не может быть разрушен, часть его остается неотделенной и будет разрушена резцом №8 (рис. 3, в). Таким образом, при выходе из строя одного из резцов схема набора коронки должна быть соответствующим образом преобразована (поломанный резец удаляется, переназначаются резцы, образующие забой для каждого  $i$ -го резца).

Для имитационного моделирования рабочего процесса комбайна с учетом возможных поломок резцов события выхода из строя для каждого  $i$ -го резца моделируются в соответствии с теорией надежности как для невозстанавливаемого объекта. Это необходимо для модельной оценки эффективности работы средств технической диагностики отказов резцов.

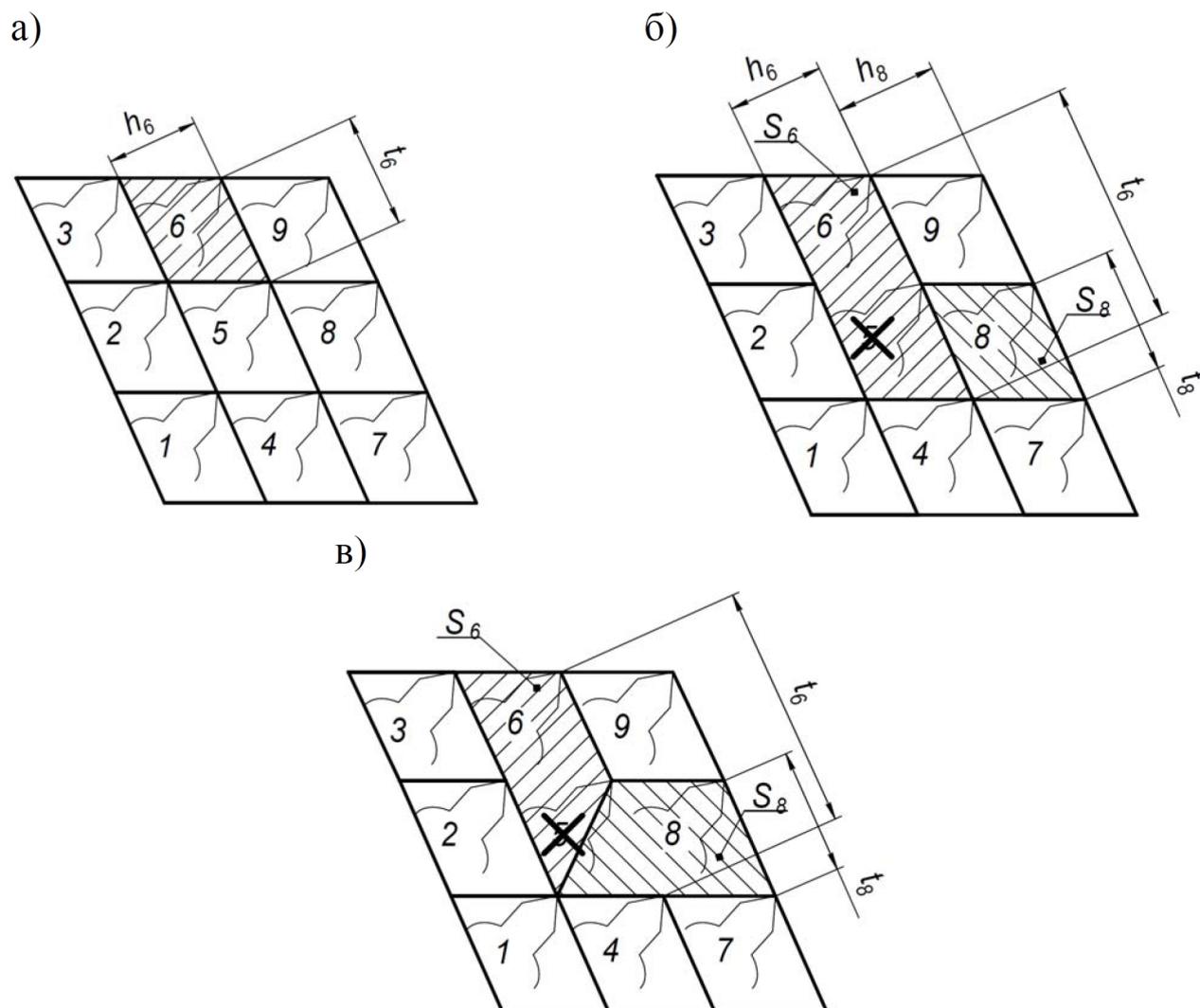


Рис. 3 - Схемы стружкообразования

*Планирование и методика экспериментальных исследований.*

Целью экспериментальных исследований являлась проверка адекватности разработанной математической модели рабочего процесса проходческого комбайна. Выработанным требованиям соответствуют условия проведения экспериментальных исследований ГП «Донгипроуглемаш» при проходке комбайном КПД вентиляционного штрека северной коренной лавы пласта  $l_2^1$  АП «Шахта «Белицкая» ГП «Добропольеуголь» (площадь сечения в проходке  $13 \text{ м}^2$ ) в 2008 г. Эксперимент проводился в два этапа:

На первом этапе (26.06.2008 г) осуществлялась регистрация тока двигателя с шагом квантования  $0,01 \text{ с}$  в процессе выполнения одного цикла обработки забоя. При этом одна из спаренных поперечно-осевых коронок имела поломанный резец, а вторая была оснащена полным комплектом резцов. Это позволило получить без монтажно-

демонтажных работ закономерности процесса разрушения забоя как при всех исправных резцах, так и при отказе одного из резцов. Результаты эксперимента использованы в работе для оценки влияния поломок резцов на эффективность рабочего процесса. Для этого этапа эксперимента методика обработки данных эксперимента предусматривала выделение отдельных режимов разрушения для каждого пласта забоя и расчет показателей:

- оценка математического ожидания нагрузки;
- оценка дисперсии нагрузки;
- коэффициент вариации нагрузки;
- коэффициентов динамичности нагрузки;
- гистограмма распределения нагрузки;
- автокорреляционная функция нагрузки;
- нормированная спектральная плотность дисперсии.

На втором этапе (с 18.11.2008 г по 22.11.2008 г) осуществлялась непрерывная регистрация тока двигателя с шагом квантования 1 с (записывались не мгновенные, а усредненные значения). Результаты эксперимента использованы в работе для оценки влияния износа резцов на эффективность рабочего процесса. При этом методика обработки предусматривала выделение смен и циклов обработки забоя и расчет показателей:

- удельные энергозатраты за  $i$  – *тый* цикл обработки забоя;
- объем разрушенной за  $i$  – *тый* цикл породы.

*Оценка адекватности математической модели рабочего процесса проходческого комбайна.*

Для реализации модельных исследований большинство параметров модели были приняты по данным работ [3-5]. Так как особенностью разработанной модели является учет постепенного износа и внезапных поломок резцов в течение цикла обработки забоя, проверка адекватности выполнялась для следующих технических состояний резцового исполнительного органа:

Состояние А – все резцы острые, поломанных резцов нет.

Состояние В – все резцы максимально изношенные, поломанных резцов нет.

Состояние С – все резцы острые, поломан 1 резец.

На рис. 4 в качестве примера приведены фрагменты записи мощности привода исполнительного органа для режима бокового ре-

за по породе крепостью  $f = 5$ , полученные в натурном и вычислительном экспериментах при состоянии коронки А.

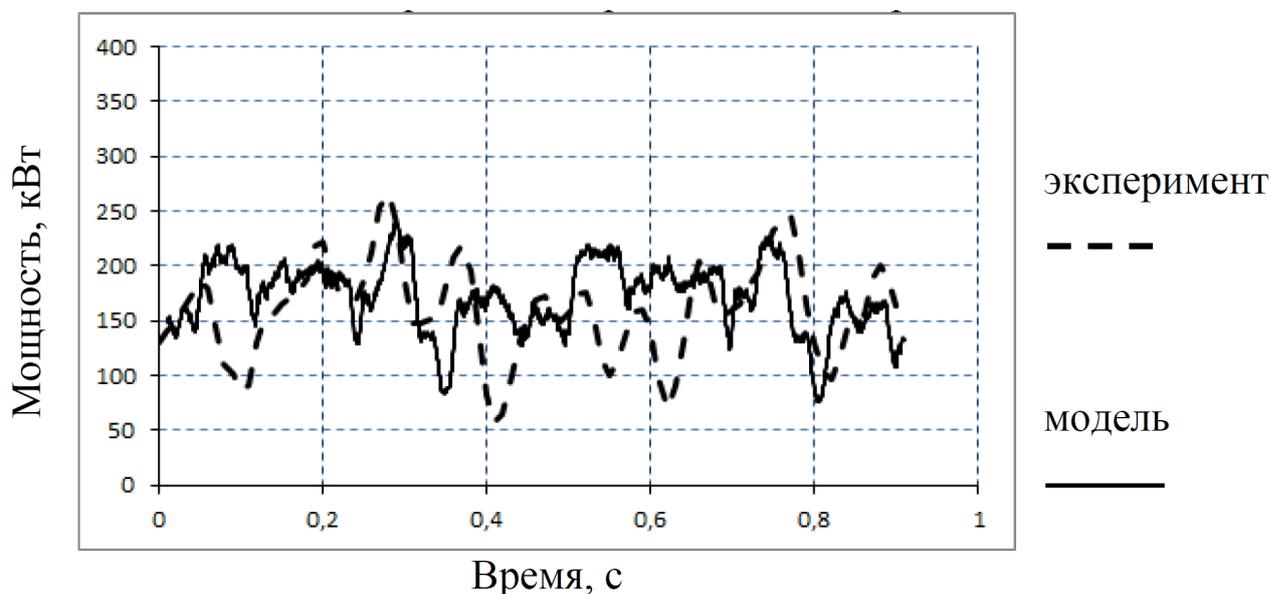


Рис. 4 - Фрагменты записи мощности привода исполнительного органа для режима бокового реза при состоянии коронки А

В таблице 1 приведено сравнение результатов модельных и экспериментальных исследований для состояний коронки А-С. Ввиду того, что максимальные нагрузки, определяющие долговечность конструкции, формируются при разрушении прочных пород, сравнение выполнялось для породы крепостью  $f = 5$  при следующих режимных параметрах: глубина зарубки  $B = 0,2$  м, шаг резания  $\Delta H = 0,6$  м. Скорости подачи исполнительного органа при этом определялись в результате моделирования с учетом подачи насоса, параметров гидравлической системы, сброса части жидкости через предохранительный клапан.

Анализ данных сравнения результатов натурального и вычислительного эксперимента показал, что расхождение оцениваемых характеристик рабочего процесса по интересующим показателям не превышает 15%.

Таблица 1 - Сравнение результатов модельных и экспериментальных исследований

Состояние	Режим раз- рушения	Характеристика рабочего процесса	Показатель	Эксперимент	Модель	Отклонение, %
1	2	3	4	5	6	7
А	боковой рез	мощность привода испол- нительного органа $P$	$M_P$ , кВт	150,6	138,0	-9,2
			$\nu_P$	0,285	0,277	-3,1
			$k_{ДР}$	2,30	2,17	-6,4
		давление в поршневой по- лости цилиндра поворо- та $P_{пов}$	$M_{P_{пов}}$ , МПа	9,13	9,72	+6,0
			$\nu_{P_{пов}}$	0,19	0,18	-3,7
			$k_{ДР_{пов}}$	1,84	1,65	-11,7
	удельные энергозатраты $W$ , кВтч/м <sup>3</sup>			5,99	5,48	-9,3
	зарубка вверх	мощность привода испол- нительного органа $P$	$M_P$ , кВт	190,7	169,6	-12,5
			$\nu_P$	0,231	0,246	+6,1
			$k_{ДР}$	1,56	1,79	+13,0
		давление в поршневой по- лости цилиндра подъема $P_{под}$	$M_{P_{под}}$ , МПа	12,2	11,7	-4,6
			$\nu_{P_{под}}$	0,19	0,17	-10,7
$k_{ДР_{под}}$			1,67	1,54	-8,2	
удельные энергозатраты $W$ , кВт·ч/м <sup>3</sup>			7,05	6,27	-12,4	
В	боковой рез	мощность привода испол- нительного органа $P$	$M_P$ , кВт	193,2	191,1	-1,1
			$\nu_P$	0,25	0,22	-12,5
			$k_{ДР}$	1,91	1,75	-9,0
		давление в поршневой по- лости цилиндра поворо- та $P_{пов}$	$M_{P_{пов}}$ , МПа	10,1	11,0	+8,1
			$\nu_{P_{пов}}$	0,15	0,18	+14,3
			$k_{ДР_{пов}}$	1,50	1,66	+9,5
	удельные энергозатраты $W$ , кВтч/м <sup>3</sup>			6,28	6,21	-1,1

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7
В	зарубка вверх	мощность привода исполнительного органа $P$	$M_P$ , кВт	198,1	198,2	0,0
			$\nu_P$	0,24	0,23	-3,2
			$k_{ДР}$	1,57	1,65	+4,9
		давление в поршневой полости цилиндра подъема $P_{под}$	$M_{P_{под}}$ , МПа	14,4	13,9	-3,4
			$\nu_{P_{под}}$	0,19	0,20	+3,2
			$k_{Др_{под}}$	1,09	1,16	+5,9
		удельные энергозатраты $W$ , кВтч/м <sup>3</sup>			7,03	7,02
С	боковой рез	мощность привода исполнительного органа $P$	$M_P$ , кВт	140,8	144,1	+2,3
			$\nu_P$	0,46	0,48	+4,5
			$k_{ДР}$	2,89	3,01	+3,9
		давление в поршневой полости цилиндра поворота $P_{пов}$	$M_{P_{пов}}$ , МПа	10,1	9,81	-2,8
			$\nu_{P_{пов}}$	0,27	0,24	-13,7
			$k_{Др_{пов}}$	2,03	1,86	-9,2
	удельные энергозатраты $W$ , кВтч/м <sup>3</sup>			5,58	5,70	+2,1
	зарубка вверх	мощность привода исполнительного органа $P$	$M_P$ , кВт	162,0	172,3	+6,0
			$\nu_P$	0,20	0,18	-9,0
			$k_{ДР}$	1,82	1,63	-11,9
		давление в поршневой полости цилиндра подъема $P_{под}$	$M_{P_{под}}$ , МПа	13,0	11,9	-9,6
			$\nu_{P_{под}}$	0,22	0,25	+11,1
			$k_{Др_{под}}$	1,69	1,96	+13,7
удельные энергозатраты $W$ , кВт·ч/м <sup>3</sup>			6,12	6,52	+6,1	

На рис. 5 приведены гистограммы распределения вероятности момента сопротивления на исполнительном органе в режиме бокового реза для состояния коронки А, полученные в натурном и вычислительном экспериментах. Визуально гистограммы близки. Для количественной оценки их совпадения была использована накопленная по-

вреждаемость на единицу объема разрушенной породы, зависимость которой для элементов трансмиссии имеет вид:

$$НП_V = \frac{30\omega}{\pi S V_n} \int_{M_0}^{M_{max}} M^m f(M) dM \left/ \left( 1 - \int_0^{M_0} f(M) dM \right) \right.,$$

где  $\omega$ ,  $M$  - угловая скорость и передаваемый крутящий момент рассматриваемого элемента трансмиссии;

$S$  - проекция разрушаемой поверхности забоя в направлении подачи коронки;

$V_n$  - скорость подачи коронки на забой;

$M_0$ ,  $M_{max}$  - значения крутящего момента, соответствующие для рассматриваемого элемента трансмиссии пределу усталости и пределу текучести;

$m$  - показатель степени кривой усталости для рассматриваемого элемента;

$f(M)$  - плотность вероятности крутящего момента.

Значения  $НП_V$  были рассчитаны для выходного вала. Расхождения экспериментальных и модельных значений составили не более 15%.

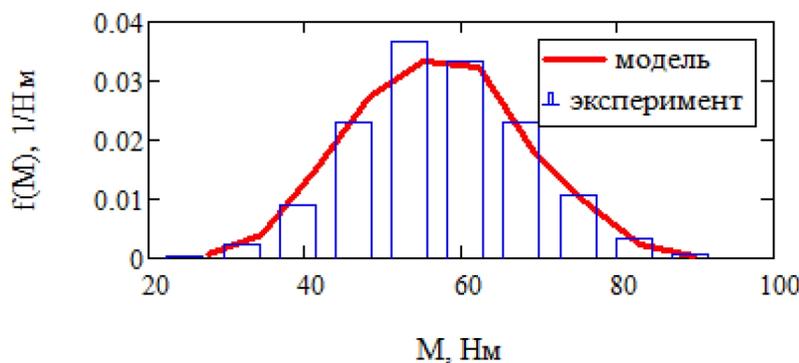


Рис. 5 - Распределение вероятности момента сопротивления на исполнительном органе в режиме бокового реза для состояния коронки А

Таким образом, подтверждена адекватность разработанной математической модели процесса разрушения забоя проходческим комбайном с учетом отказов рабочего инструмента. Адекватность математической модели также обеспечена использованием уже апробированных математических моделей ФЗЭ в части описания механиче-

ских, гидравлических и электрических процессов мехатронных функционально законченных элементов, входящих в модель.

**Выводы и направление дальнейших исследований.** Разработана математическая модель процесса разрушения забоя проходческим комбайном с учетом отказов рабочего инструмента, отличающаяся алгоритмом расчета толщины среза через шаг резания и площадь среза, который позволяет практически исключить погрешность оценки объемов породы, отделяемых резцами в процессе разрушения забоя. Математическая модель содержит 60 взаимоувязанных по входам и выходам частных ММ ФЗЭ 22 типов. Адекватность модели подтверждена результатами натурного эксперимента, проведенного в условиях конвейерного штрека коренной северной лавы пласта к8 горизонта 450 м участка УПР2 ГОАО «Шахта «Добропольская» ГХК «Добропольеуголь» с регистрацией нагрузок силовых систем комбайна КПД в различных режимах разрушения забоя. Отклонения результатов моделирования мощности двигателя привода исполнительного органа и усилий на штоках гидроцилиндров составляют не более 15 %. Модель может быть использована для разработки средств и методик косвенной диагностики технического состояния режущего инструмента в без останковки комбайна и обоснования эффективной стратегии замены изношенного инструмента.

#### Список литературы

1. Биргер И.А. Техническая диагностика / И.А. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978.–240 с.
2. Шабаев О.Е. Принципы интеллектуализации рабочих процессов мехатронной горной выемочной машины / О.Е. Шабаев, А.К. Семенченко, Н.В. Хиценко // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2010. – №1. – С. 68-77.
3. Оценка эффективности проходческого комбайна с интеллектуальной системой «управление-подача» исполнительного органа / О.Е. Шабаев, А.К. Семенченко, Е.Ю. Степаненко, Н.В. Хиценко // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2009. – №1. – С. 207-218.
4. Математическая модель рабочего процесса горной выемочной машины как мехатронного объекта / О.Е. Шабаев, А.К. Семенченко, Н.В. Хиценко, Е.Ю. Степаненко // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2010. – №2. – С. 253-264.
5. Моделирование рабочего процесса проходческого комбайна как мехатронного объекта / О.Е. Шабаев, Н.В. Хиценко, Н.И. Стадник, В.А. Мизин. // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2011. – №1. – С. 72-83.
6. Семенченко А.К. Оценка эффективности способов регулирования нагрузки на привод резания комбайна типа П110 в условиях Донбасса / А.К. Семенченко, Н.В. Хиценко // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2004. – №2 – С. 109-115.
7. Нацвлишвили В.З. Установление нагрузок на поворотных резцах в процессе их изнашивания при работе проходческих комбайнов: автореф. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / В.З. Нацвлишвили. – Тбилиси: Груз. политехн. ин-т им. В.И. Ленина, 1982. – 15 с.
8. Математическая модель формирования вектора внешнего возмущения на аксиальной коронке мехатронного проходческого комбайна / А.К. Семенченко, О.Е. Шабаев, Н.В. Хи-

- ценко, Е.Ю. Степаненко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Гірничо-електромеханічна». – 2010. – Вип. 18(172). – С. 3-12.
9. ОСТ 12.44.258–84. Комбайны очистные. Выбор параметров и расчет сил резания и подачи на исполнительных органах. Методика. Введен с 01.01.1986. – М.: Минуглепром СССР, 1984. – 107 с.
10. ОСТ 12.44.197–81. Комбайны проходческие со стреловидным исполнительным органом. Расчет эксплуатационной нагруженности трансмиссии исполнительного органа. Введен с 01.07.1982. – М.: Минуглепром СССР, 1981. – 48 с.
11. 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. – Вип. 27. – С 161–168.

*Стаття надійшла до редакції 18.10.2013*

***О.Є. Шабаяев, М.В. Хіценко, І.І. Брідун. ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»***

**Математична модель процесу руйнування забою прохідницьким комбайном з урахуванням відмов робочого інструменту**

*Розроблена математична модель процесу руйнування вибою прохідницьким комбайном, що враховує зношування і можливість поломки різців в процесі роботи. На основі натурного експерименту встановлена адекватність розробленої моделі. Модель може бути використана для розробки засобів і методик непрямої діагностики технічного стану ріжучого інструменту без зупинки комбайна і обґрунтування ефективної стратегії заміни зношеного інструменту.*

**Ключові слова:** прохідницький комбайн, різець, зношування, відмова, математична модель, функціонально-завершений елемент.

***O. Shabayev, N. Khitsenko, I. Bridun. Donetsk National Technical University***

**Mathematical Model of Face Destruction by Roadheader Considering Working Tool Failures.**

*A mathematical model of face destruction by roadheader, which takes into account possible breakage and wear of cutting tools during operation, is considered. On the basis of field experiment the adequacy of the model is confirmed. The model can be used for developing tools and techniques for indirect diagnosis of the cutting tool technical condition without stopping the roadheader and validation of effective strategy for worn-out tool replacement.*

**Keywords:** roadheader, cutting tool, wear, failure, mathematical model, stand-alone element.