

УДК 622.232.72.063

**В. Г. Нечепаяев**, д-р техн. наук, проф., **О. Е. Шабаяев**, д-р техн. наук, проф.,  
**Е. Ю. Степаненко**, к-т техн. наук, доц., **П.П. Зинченко**, аспирант  
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
Тел. / Факс: +38 (062) 3010893; E-mail: [pawel.zin4encko@yandex.ru](mailto:pawel.zin4encko@yandex.ru)

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ШНЕКОВЫХ ОЧИСТНЫХ КОМБАЙНОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ВЫЕМКИ ТОНКИХ ПОЛОГОНАКЛОННЫХ ПЛАСТОВ

*Разработана математическая модель, позволяющая имитировать совместно и одновременно протекающие процессы разрушения и погрузки разрушенной горной массы шнековыми исполнительными органами очистных комбайнов, работающих в условиях тонких пологонаклонных пластов. Представленная модель в существенной мере учитывает специфику рабочего процесса погрузки разрушенной горной массы очистными комбайнами, работающими в условиях тонких пологонаклонных пластов – циркуляцию горной массы в рабочем пространстве шнека, формирование ее объемного напряженного состояния и другие основные специфические особенности процесса погрузки шнеками малого диаметра. Модель обеспечивает возможность варьирования исходных данных во всем возможном диапазоне изменения конструктивных и режимных параметров современных очистных комбайнов, предназначенных для выемки тонких пологонаклонных пластов. Модель ориентирована на использование в качестве соответствующей теоретической основы при создании комбайнов для выемки тонких пологонаклонных пластов высокого технического уровня.*

**Ключевые слова:** математическая модель, имитация, рабочий процесс, очистной комбайн, пологонаклонные пласты, шнековый исполнительный орган, разрушение, погрузка, циркуляция.

**V. Nechepayev, O. Shabayev, E. Stepanenko, P. Zinchenko**

## IMITATION MODEL OF THE OPERATION OF THE SHEARERS WORKING IN CONDITIONS OF THIN GENTLY SLOPING SEAMS.

*A mathematical model has been developed that makes it possible to simulate, simultaneously, the processes of destruction and loading of the destroyed rock mass with auger actuators of shearers working in conditions of thin gently sloping seams. The presented model substantially takes into account the specificity of the working process of loading the destroyed rock mass by shearers working in conditions of thin gently sloping seams - the circulation of the mountain mass in the auger working space, the formation of its volumetric stress state and other specific features of the loading process with small diameter screws. The model provides the possibility of varying the initial data with a total possible range of the structural and operating parameters of modern shearers intended for gently sloping recess thin layers. The model is focused on the use as an appropriate theoretical basis for the creation of combines for the extraction of thin gently sloping seams of a high technical level.*

**Keywords:** mathematical model, imitation, workflow, shearer, gently inclined seams, auger actuator, destruction, loading, circulation.

### 1. Введение:

Основным энергетическим ресурсом Донецкого региона является каменный уголь, запасы которого оцениваются (по данным ДонУГИ) порядка 6,84 млрд. т. При этом 83,2 % этих запасов сосредоточены в шахтопластах мощностью 0,55 – 1,2 м [1].

Горногеологические и горнотехнические условия залегания угольных пластов Донбасса характеризуются как весьма сложные. Шахтопласты имеют беспокойную гипсометрию, содержат в своей структуре породные прослойки и твердые включения, залегают на глубине 1050...1500 м [1]. Только незначительная часть шахтопластов (127

из 1092) являются пригодными для струговой выемки (наиболее прогрессивной для выемки пластов малой мощности). Ограничения в применении струговых комплексов обуславливают преимущественное применение очистных комбайнов в составе механизированных комплексов в рассматриваемых условиях.

Процесс выемки углей очистными комбайнами из тонких пологонаклонных пластов существенно затрудняется недостаточной погрузочной способностью их шнековых исполнительных органов малого диаметра, которая сопровождается высокими энергозатратами процесса погрузки [3, 4, 6]. Это определяет ограничение скорости рабочего перемещения машины до 3...5 м/мин, и как следствие - низкую теоретическую производительность очистного комбайна и низкую производительность выемки в целом.

В условиях тонких пологонаклонных пластов значительное ограничивающее влияние на рабочий процесс погрузки разрушенной горной массы очистными комбайнами оказывает также ширина захвата шнека [7]. Это обусловлено тем, что с увеличением ширины захвата возрастает объем циркулирующего угля, а это влечет за собой соответствующее возрастание энергозатрат процесса погрузки. Причем увеличение ширины захвата определяет нелинейный прирост объема циркулирующего угля. Поэтому удельные энергозатраты на разрушение и погрузку угля могут быть существенно снижены путем выбора рациональной ширины захвата шнека для рассматриваемых горно-геологических и горнотехнических условий с сохранением заданной технической производительности [8].

Изложенное позволяет сделать вывод о существенной актуальности возможно полного учета специфических особенностей рабочих процессов разрушения и погрузки разрушенной горной массы шнековыми исполнительными органами малого диаметра (определяемых, в первую очередь, конструктивными особенностями современных очистных комбайнов, предназначенных для выемки тонких пологонаклонных пластов) при создании высокоэффективных очистных комбайнов нового технического уровня, предназначенных для выемки углей в условиях Донецкого региона.

Наиболее достоверные данные о влиянии тех или иных конструктивных и режимных параметров на процессы разрушения и погрузки горной массы можно получить при натурных исследованиях в реальных условиях или при стендовых исследованиях в приближенных к реальным условиям работы машины. Однако значительная сложность и трудоемкость проведения натурных экспериментов для накопления значительного объема статистических данных в совокупности со стремительным развитием и совершенствованием IT-технологий в последнее время обуславливают целесообразность использования имитационного моделирования в качестве оптимально эффективного инструмента для исследования сложных физических процессов разрушения и погрузки горной массы исполнительными органами очистных комбайнов, предназначенных для выемки тонких пологонаклонных пластов.

## **2. Анализ последних исследований и публикаций:**

Созданию математических моделей процессов разрушения и погрузки разрушенной горной массы на забойный конвейер посвящены работы многих ученых [2-6]. Основные физические закономерности взаимодействия исполнительных органов очистных комбайнов с разрушаемым забоем, а также теоретические основы имитационного моделирования работы очистных комбайнов с использованием ЭЦВМ приведены в [2]. Вопросы установления закономерностей формирования нагрузки на шнековых исполнительных органах очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов при погрузке горной массы, рассмотрены в [3-4]. В [5] с применением имитационного мо-

делирования рабочих процессов очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов получены алгоритмы управления режимными параметрами комбайнов, обеспечивающие отсутствие заштыбовки шнека. Автором работы [6] выполнен анализ влияния основных геометрических параметров исполнительных органов (включая параметры корпусных групп), а также направление их вращения на физическую картину процесса погрузки разрушенной горной массы шнековыми очистными комбайнами в условиях тонких пологонаклонных пластов. При этом в работе в явном виде отсутствует соответствующая математическая модель, способная воспроизводить рассматриваемые процессы.

### **3. Цель (задачи) исследования:**

Целью настоящей работы является разработка имитационной математической модели, позволяющей с достаточной степенью достоверности описывать основные физические процессы разрушения и погрузки разрушенной горной массы, протекающие в шнековых исполнительных органах очистных комбайнов при функционировании их в условиях тонких пологонаклонных пластов.

### **4. Основной материал исследования:**

При разработке модели процесса разрушения и погрузки разрушенной горной массы шнековыми исполнительными органами очистных комбайнов, предназначенных для выемки тонких пологонаклонных пластов, приняты следующие ограничения и допущения:

- скорость резания шнека – величина постоянная;
- скорость перемещения очистного комбайна – величина переменная и широко варьируется в процессе выемки (в пределах  $0 - V_{n.max}$  м/мин);
- направление вращения опережающего шнека - «от почвы к кровле», а отстающего - «от кровли к почве» в соответствии с общепринятой современной компоновочной схемой очистных комбайнов, предназначенных для выемки тонких пологонаклонных пластов;
- $\frac{1}{2}$  объема горной массы, разрушенной резцами, установленными на отрезном диске (лобовине) шнека, поступает в межлопастное пространство. Оставшийся объем остается на почве пласта и уходит в зазоры [6];
- колебаниями исполнительного органа и корпуса комбайна в вертикальной и горизонтальной плоскостях можно пренебречь при решении поставленных задач;
- площадь среза резцов забойной, кутковой и крайней кутковой групп можно принять равными при решении поставленных задач;
- перемещаемый и выгружаемый шнеком очистного комбайна уголь рассматривается как сплошная сыпучая среда [3];
- составляющие физического процесса погрузки разрушенной горной массы шнековыми исполнительными органами очистных комбайнов, предназначенных для выемки тонких пологонаклонных пластов (циркуляция горной массы в рабочем пространстве шнека, формирование ее объемного напряженного состояния и др.), приняты в соответствии с общепринятыми представлениями [3, 4-6].

Корпусная группа современных очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов вынесена в уступ забоя и оснащается дополнительной опорной лыжей (например, комбайны УКД200-250, УКД400, УКД200-500, МВ 444Р и т.д.). Поэтому, по условию нормальной эксплуатации комбайна, его опережающий шнек разрушает пачку угля, прилегающую к почве пласта, и осуществляет погрузку отбитой массы на решетчатый став забойного конвейера, а отстающий шнек выполняет в основном, функцию

разрушения оставшейся пачки угля у кровли. Тогда, с учетом вышесказанного расчетная схема представлена на рис. 1.

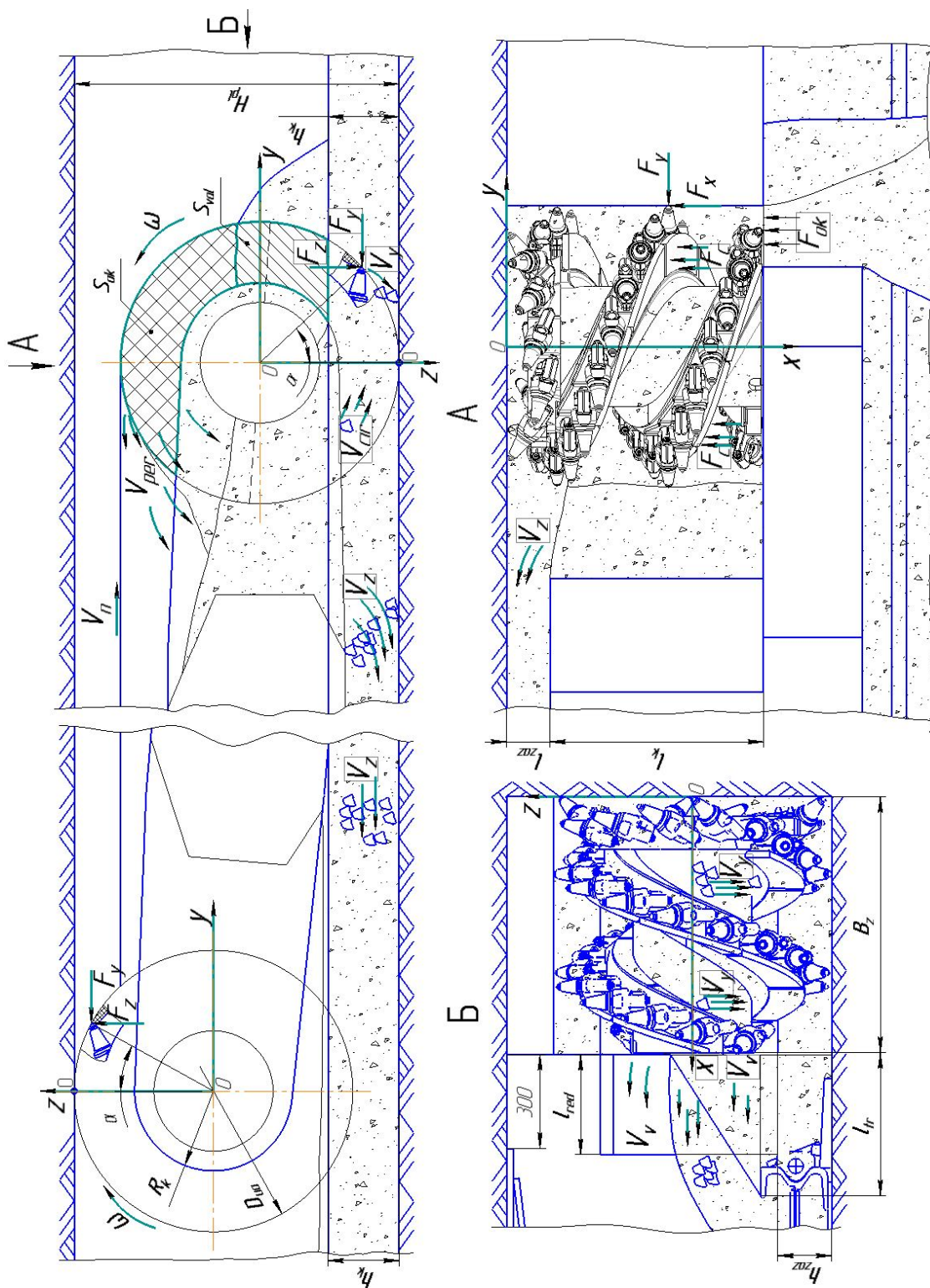


Рисунок 1. Расчетная схема для составления математической модели процессов разрушения и погрузки угля шнеками очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов

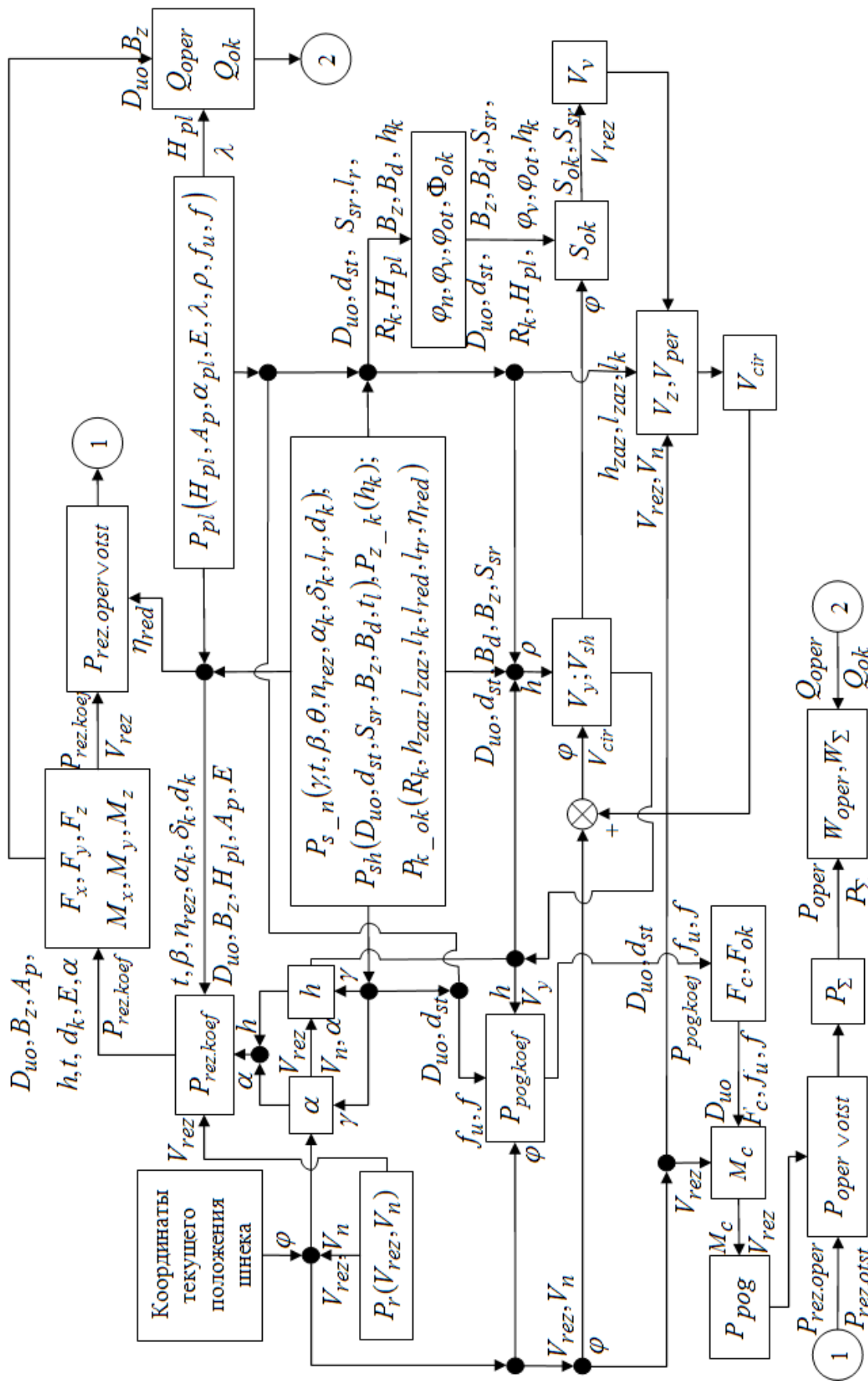


Рисунок 2. Структурная схема математической модели процессов разрушения и погрузки разрушенной горной массы шнековым исполнительным органом очистных комбайнов для тонких пологонаклонных пластов

Для составления математической модели введем прямоугольную систему координат OXYZ, начало которой находится в точке пересечения оси вращения шнека и плоскостью груди забоя (рис. 1). Ось X совпадает с осью вращения шнека и откладывается в направлении от отрезного диска шнека к его разгрузочному торцу. Ось Z расположена перпендикулярно почве пласта и совпадает с координатной осью силы резания Z. Ось Y параллельна почве пласта, совпадает с направлением перемещения комбайна вдоль забоя и координатной осью силы подачи Y. Структурная схема разрабатываемой математической модели представлена на рис. 2. Математическая модель, соответствующая представленной структурной схеме, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{s\_n}(\gamma, t, \beta, \theta, n_{rez}, \alpha_k, \delta_k, l_r, d_k); P_{sh}(D_{uo}, d_{st}, S_{sr}, B_z, B_d, t_l); P_{z\_k}(h_k); \\ P_{pl}(H_{pl}, A_p, E, \lambda, \rho, f_u, f); P_{k\_ok}(R_k, h_{zaz}, l_{zaz}, l_k, h_{k\_red}, l_{red}, l_{tr}, \eta_{red}); P_r(V_{rez}, V_n); \\ V_n \in 0 \quad V_{n.max}; \\ V_v = f(S_{ok}, \varphi_v, \varphi_n, D_{uo}, R_k, h_k, V_{os}); V_z = f(V_n, h_{zaz}, l_{zaz}, l_k); V_{per} = V_y(\varphi_{sh}) - V_v \\ V_{cir} = V_{per} - V_v; \\ \varphi \in 0 \quad 2\pi; \\ k \in 0 \quad N_{rez}; \\ \alpha = \varphi + \gamma; \\ h = f(V_n, n_{ob}, \alpha); \\ P_{rez.koef} = f(h, t, \alpha_{kin}, \delta_{kin}, d_r, K_Y, K_Z, K_{pr}, S_{zat}, C_n, K_{otg}) \\ F_x, F_y, F_z = f(P_{rez.koef}, Z, Y, X, P_{pl}) \\ M_x, M_y, M_z = f(P_{rez.koef}, Z, Y, X, P_{sh}, P_{pl}) \\ V_y = V_r + V_{cir}; V_{sh} = V_{rab} - V_{cir}; P_{pog.koef} = f(P_{sh}, P_{pl}, P_{k\_ok}, h_y) \\ h_y = f(V_y); P_c = f(S_p, f_u); M_{pog} = f(P_c, P_{ok}, f_u, S_p); P_{pog} = f(P_c, f_u, S_p); \\ k_{cir} = f(V_{sh}, V_{cir}); P_{rez.oper} = f(Z, V_{rez}, \eta_{red}); P_{rez.otst} = f(k_{osl}, Z, V_{rez}, \eta_{red}); \\ P_{oper} = f(P_{rez.oper}, P_{pog}); P_{otst} = f(P_{rez.otst}); P_{\Sigma} = f(P_{oper}, P_{otst}); \\ Q_{oper.teh} = 60 \times B_z \times D_{sh} \times V_n \times \lambda \times K_{tehi}; Q_{ok.teh} = 60 \times B_z \times H_{pl} \times V_n \times \lambda \times K_{tehi} \\ W_{oper} = \frac{P_{oper}}{60 \times B_z \times D_{sh} \times V_n \times \lambda}; W_{\Sigma} = \frac{P_{\Sigma}}{60 \times B_z \times H_{pl} \times V_n \times \lambda}, \end{array} \right.$$

где:

$P_{s\_n}(\gamma, t, \beta, \theta, n_{rez}, \alpha_k, \delta_k, l_r, d_k)$  – параметры схемы набора исполнительного органа ( $\gamma$  – угол установки резака по диаметру, град;  $t$  – шаг резания, см;  $\beta$  – угол наклона резака относительно вектора скорости, град;  $\theta$  – угол установки резака, град;  $n_{rez}$  – количество резов в одной линии резания, шт;  $\alpha_k$  – конструктивный задний угол резака, град;  $\delta_k$  – конструктивный угол заострения резака, град;  $l_r$  – радиальный вылет резака, см;  $d_k$  – конструктивный диаметр керны резака, см);

$P_{sh}(D_{uo}, d_{st}, S_{sr}, B_z, B_d, t_l)$  – геометрические параметры исполнительного органа ( $D_{uo}$  – диаметр шнека по резакам, м;  $d_{st}$  – диаметр ступицы шнека, м;  $S_{sr}$  – средний

шаг навивки лопасти шнека, м  $B_z$  – ширина захвата шнека по резцам, м  $B_d$  – ширина отрезного диска, м;  $t_l$  – расстояние между соседними лопастями, м);

$P_r(V_{rez}, V_n)$  – режимные параметры работы комбайна ( $V_{rez}$  – скорость резания шнека, м/с;  $V_n$  – скорость подачи очистного комбайна, м/мин);

$P_{k-ok}(R_k, h_{zaz}, l_{zaz}, l_k, h_{k-red}, l_{red}, l_{tr}, \eta_{red})$  – геометрические параметры корпуса очистного комбайна ( $R_k$  – радиус корпуса качалки, м;  $h_{zaz}$  – высота зазора, м;  $l_{zaz}$  – длина зазора, м;  $l_k$ ,  $h_{k-red}$  – длина и ширина корпуса редуктора с нерабочей стороны шнека, м;  $l_{red}$  – ширина корпуса рукоятки редуктора, м;  $l_{tr}$  – расстояние от разгрузочного торца шнека и до полки решетчатого става конвейера, м;  $\eta_{red}$  – КПД редуктора резания комбайна, м);

$P_{pl}(H_{pl}, A_p, \alpha_{pl}, E, \lambda, \rho, f_u, f)$  – горно-геологические и горнотехнические параметры разрушаемого горного массива ( $H_{pl}$  – мощность вынимаемого пласта, м;  $A_p$  – сопротивляемость угля резанию в не отжатом массиве, кН/м;  $\alpha_{pl}$  – угол наклона пласта, град;  $E$  – степень хрупкости пласта,  $\lambda$  – плотность разрушенного угля, т/м<sup>3</sup>;  $\rho$  – коэффициент разрыхления угля;  $f_u$ ,  $f$  – коэффициенты трения угля по углю и по металлической поверхности соответственно [9]);

$S_{ok}$  – площадь окна выгрузки, м<sup>2</sup> [3-4, 6];

$S_{val}$  – площадь окна выгрузки, занимаемая валком, м<sup>2</sup> [3-4, 6];

$\varphi_n$  – угол, обусловленный нижней частью корпуса качалки редуктора резания, град [3-4, 6];

$\varphi_v$  – угол, обусловленный верхней частью корпуса качалки редуктора резания, град [3-4, 6];

$\varphi_{ot}$  – угол открытия окна выгрузки, град [3-4, 6];

$\Phi_{ok}$  – угол, на котором окно выгрузки остается открытым, рад [3-4, 6];

$V_v$  – выгруженный объем горной массы, который может пройти через окно выгрузки, м<sup>3</sup>/об [3-4, 6];

$V_z$  – текущий объем разрушенного угля, прошедшего в зазоры, м<sup>3</sup>/об;

$\Delta V_y$  – текущий объем переброшенного угля, который затянется в рабочий объем шнека и повторно примет участие в процессе погрузки, м<sup>3</sup>/об [3-4];

$V_y(\phi_{sh})$  – объем разрушенного угля, за один оборот шнека, м<sup>3</sup>/об [3-4];

$h$  – текущая толщина стружки, см;

$\alpha$  – текущее положение исполнительного органа, град;

$P_{rez.koef}$  – параметры коэффициентов, используемых при расчете сил резания горного массива;

$\alpha_{kin}$ ,  $\delta_{kin}$  – текущий кинематический задний и угол резания резца, град [2, 10];

$d_r$  – текущее значение диаметра керна резца, контактируемого с забоем, см [2, 10];

$K_Y, K_Z, K_{pr}, C_n, K_{otg}$  – текущие коэффициенты, учитывающие влияние кинематического угла резания на удельную энергию резания, обнажения забоя, влияния поворотного резца на силу резания, пропорциональности между силами подачи на затупленном и остром резце, отжим массива [2, 10];

$S_{zat}$  – проекция площади затупления резца на плоскость резания резца,  $m^2$  [2, 10];

$Z, Y, X$  – силы резания, подачи и боковые с учетом затупления резца, Н [2, 10];

$V_r$  – объем угля, разрушенный и поступивший в рабочий объем шнека,  $m^3$  [3-4];

$V_y$  – объем угля разрушенный и поступивший в рабочий объем шнека с учетом переброшенного и затянутого в рабочее пространство шнека  $m^3$ ;

$V_{rab}$  – рабочий объем шнека  $m^3$  [3-4];

$V_{sh}$  – рабочий объем шнека, с учетом переброшенного и затянутого в рабочее пространство угля,  $m^3$ ;

$h_y$  – высота перемещаемого слоя угля,  $m$  [5];

$P_{pog.koef}$  – параметры коэффициентов, используемых при расчете сил действующих на лопасти шнека при погрузке, им разрушенной горной массы [3-4];

$P_c$  – нормальное давление угля на лопасть, кПа [3-4];

$M_{pog}$  – момент, формирующийся от погрузки угля шнеком, кН [3-4];

$k_{cir}$  – коэффициент циркуляции угля [3-4];

$P_{rez.oper}, P_{rez.otst}$  – мощности, затраченные на разрушение угля опережающим и отстающим шнеками, приведенные к двигателю привода резания, кВт [2, 10];

$P_{oper}, P_{otst}$  – суммарные мощности, затраченные на разрушение и погрузку разрушенной горной массы опережающим и отстающим шнеками, кВт;

$P_{\Sigma}$  – суммарная мощность, затраченная при работе опережающим и отстающим исполнительных органах очистного комбайна, кВт;

$Q_{oper.teh}, Q_{ok.teh}$  – техническая производительность опережающего шнека и очистного комбайна, м/час;

$K_{teh}$  – коэффициент технического использования очистного комбайна;

$W_{oper}, W_{\Sigma}$  – удельные энергозатраты на разрушение и погрузку на опережающем исполнительном органе и очистным комбайном в целом, кВт ч/т.

## 5. Выводы

Разработана математическая модель, позволяющая имитировать совместно и одновременно протекающие процессы разрушения и погрузки разрушенной горной массы шнековыми исполнительными органами очистных комбайнов, работающих в условиях тонких пологонаклонных пластов.

Представленная модель в существенной мере учитывает специфику рабочего процесса погрузки разрушенной горной массы – циркуляцию, формирование объемного напряженного состояния и другие основные специфические особенности процесса погрузки шнеками малого диаметра.



Модель обеспечивает возможность варьирования исходных данных во всем возможном диапазоне изменения конструктивных и режимных параметров современных очистных комбайнов для выемки тонких пологонаклонных пластов.

Модель ориентирована на использование при создании комбайнов для выемки тонких пологонаклонных пластов высокого технического уровня, исходя их требований минимальной энергоемкости основных рабочих процессов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Горные машины для подземной добычи угля: учебное пособие для вузов / П. А. Горбатов, Г. В. Петрушкин, Н. М. Лысенко, С. В. Павленко, В. В. Косарев; под общ. ред. П.А. Горбатова; 2-е, перераб. и доп. – Донецк: Норд Компьютер, 2006. – 669 с.: ил.
2. Моделирование разрушения углей режущими инструментами. АН СССР, ИГД им. А.А. Скочинского. – М.: Наука, 1981. – 181 с.
3. Нечепаяев, В. Г. Механо-гидравлические шнековые системы выгрузки и транспортирования. / Нечепаяев В.Г. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – 215 с.
4. Бойко, Н. Г. Очистные комбайны для тонких пластов / Бойко Н. Г. – Донецк, ДВНЗ «ДонНТУ», 2010. – 476 с.
5. Ткачев, В. В. Использование имитационного моделирования для исследования системы автоматического управления добычным комбайном. / В. В Ткачев, А.В. Бубликов // МОН Украины, Нац. Горн. Ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 182 с.
6. Тарасевич, В. И. Повышение производительности выгрузки угля очистными комбайнами для тонких пластов со шнековыми исполнительными органами: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. И.Тарасевич. – Донецк, 1979. – 21 с.
7. Шабаев, О. Е. Оценка влияния ширины захвата шнекового исполнительного органа очистного комбайна для тонких пологих пластов на энергетические параметры машины / О. Е. Шабаев, Е. Ю. Степаненко, П. П. Зинченко // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 22-25 мая 2018 г. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Т. 3 / Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. – С. 47 – 50.
8. Шабаев, О. Е. Методика определения оптимальной ширины захвата шнекового исполнительного органа очистных комбайнов / О. Е. Шабаев, В. Г. Нечепаяев, П. П. Зинченко // Машиностроение и техносфера XXI века. Сборник трудов XXV международной научно-технической конференции в г. Севастополе 10-16 сентября 2018 г. в 2-х т. – Донецк: ДонНТУ, 2018. – Т. 2 – С. 237-243.
9. Зенков, Р.Л. Механика насыпных грузов / Зенков Р.Л. – Москва: Машиностроение, 1964. – 251 с.
10. КД 12.10.040-99. Изделия угольного машиностроения. Комбайны очистные. Методика выбора параметров и расчета сил резания и подачи на исполнительных органах (взамен ОСТ 12.44.258-84). – Введ. 2000-01-01. – Донецк: Минуглепром Украины, 1999. – 75 с.

Поступила в редколлегию 14.02.2019 г.