

- перболических систем уравнений. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 608 с.
- 2. Магамедов К.М., Холодов А.С. Сеточно-характеристические численные методы. – М.: Наука, 1988. – 290 с.
- 3. Галиев Ш. У. Динамика гидроупругопластических систем.– Киев: Наукова думка, 1981. – 276 с.
- 4. Коломенская В.В., Семко А.Н. Об использовании метода потенциалов для расчета газодинамических течений // Вісник Донецького університету. Серія А. – Природничі науки, 2002. – №2. – С. 244 – 248.
- 5. Рождественский, Яненко Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике. – М.: Наука, 1978. – 687 с.
- 6. Роуч П. Вычислительная гидродинамика – М.: Мир, 1980. – 612 с.
- 7. Родионов А. В. Монотонная схема второго порядка аппроксимации для сквозного расчета неравновесных течений // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 1987. – Т. 27. – С. 585 – 593.

пост. 27.06.07.

Математическая модель формирования рабочей зоны карьера

Б.Е. СОБКО

Національний гірничий університет

Представлена математическая модель рабочей зоны карьера при разработке горизонтального месторождения. Рассмотрены взаимосвязи параметров системы разработки, параметров рабочей зоны карьера, производственной мощности карьера.

Представлена математична модель робочої зони кар'єра при розробці горизонтального родовища. Розглянуті взаємозв'язки параметрів системи розробки, параметрів робочої зони кар'єра, виробничої потужності кар'єра.

The mathematical model of a working zone opencast is present by development of a horizontal deposit. Interrelations parameters of the system development, parameters of the working zone opencast and industrial power the opencast are considered.

Согласно «Концепции развития горно-металлургического комплекса Украины до 2010 года», одобренной постановлением Верховного Совета Украины, одним из основных условий функционирования горно-металлургического комплекса страны является переориентация производственных процессов на ресурсосберегающие технологии и комплексное использование природных ресурсов. Стабильная работа горных предприятий разрабатывающих горизонтальные и пологопадающие месторождения полезных ископаемых в большой степени зависит от эффективности использования оборудования при правильно выбранных параметрах рабочей зоны карьера. Выбор параметров рабочей зоны карьера является сложным многофакторным исследованием, которое до настоящего времени полностью не проведено. При жесткой взаимосвязи вскрышных, добычных и отвальных работ карьера, разрабатывающего горизонтальную или пологопадающую залежь, любые изменения технологической схемы оказывают влияние на эффективность работы карьера в целом. Учесть такие изменения при разработке месторождения и наиболее полно оценить их последствия можно с помощью математической модели рабочей зоны карьера.

В этой связи разработка математической модели формирования рабочей зоны карьера является актуальной научной задачей.

В теории моделирования производственных процессов, относящихся к сложным системам [1, 2], математической моделью процесса A может служить система соотношений вида:

$$\left. \begin{matrix} x_1(t) = f_1(t, a_1, a_2, a_3, \dots, a_k); \\ x_2(t) = f_2(t, a_1, a_2, a_3, \dots, a_k); \\ \dots \\ x_n(t) = f_n(t, a_1, a_2, a_3, \dots, a_k); \end{matrix} \right\}, \quad (1)$$

где a_1, a_2, a_3 и т.д. – параметры процесса; t – продолжительность процесса; x_1, x_2, \dots, x_n – характеристики процесса.

При известных функциях f_1, f_2, \dots, f_n (точно или с необходимой степенью приближения) соотношения (1) в данных условиях являются идеальной математической моделью процесса A.

Математической формализации отдельных процессов открытой разработки горизонтальных месторождений, в т.ч. и взаимосвязей параметров технологических схем различных систем разработки посвящены работы [3, 4, 5, 6].

Так, например, в работе [4] взаимосвязь основных параметров систем разработки, производительности вскрышного оборудования и производственной мощности карьера представлена в виде следующей математической модели:

$$\left. \begin{aligned}
 Q_k &= \left(\frac{Q_{\dot{y}} - H^2 S_r \operatorname{ctg} \alpha}{H} \right) m q K_{\dot{e} \dot{c}}; \\
 H_n &= \frac{Q_{\dot{y}i}}{S_{ri} \left(L_{\dot{a}} + 2 \operatorname{ctg} \alpha_p \sum_{i=1}^{n-1} H_i \right)}; H_i \leq H_r; \\
 \alpha_p &= \operatorname{arccctg} \left[\operatorname{ctg} \alpha + \frac{(n-1)(B+C)}{2H_k} \right]; \\
 S_r &= \frac{Q_k}{L_{\dot{a}} m q K_{\dot{e} \dot{c}}}; L_{\dot{a}} = \frac{Q_{\dot{y}}}{H S_r} - H \operatorname{ctg} \alpha; \\
 \frac{Q_k}{L_{\dot{a}} m q K_{\dot{e} \dot{c}}} &= \frac{Q_{\dot{y}i}}{L_n H_n}
 \end{aligned} \right\} (2)$$

где Q_k – производственная мощность карьера, т/год; $Q_{\dot{y}}$ – производительность вскрышного оборудования, м³/год; H – высота уступа, м; H_i и H_n – соответственно высоты i -го и n -го уступов; S_r – годовое подвигание фронта горных работ, м; m , g , $K_{\dot{e} \dot{c}}$ – соответственно мощность, плотность и коэффициент извлечения полезного ископаемого; α_p – результирующий угол откоса торцовых бортов карьера, град.; α – угол откоса уступов в торцах, град.; n – число вскрышных уступов; $L_{\dot{a}}$ – длина добычного фронта горных работ, м.

Недостатком приведенной модели является то, что в ней не отражается влияние указанных взаимосвязей на сам процесс формирования рабочей зоны карьера, не учитываются изменения параметров и показателей развития рабочей зоны (расстояния транспортирования вскрышных пород во внутренний отвал и протяженность транспортных коммуникаций). Кроме этого представленная математическая модель не позволяет производить сравнительную оценку технологических схем систем разработки месторождения и производить выбор наиболее рациональной их них.

Цель исследований ставилась разработка математической модели формирования рабочей зоны карьера при освоении месторождений с горизонтальным залеганием полезного ископаемого.

Задача исследований – разработка алгоритма расчета параметров рабочей зоны карьера при различных технологических схемах отработки горизонтальных месторождений.

В общем случае, построение математически формализованной схемы производственного процесса, построение математической модели и моделирование самого процесса решения поставленной задачи представляются в виде структурной схемы приведенной на рис.1.

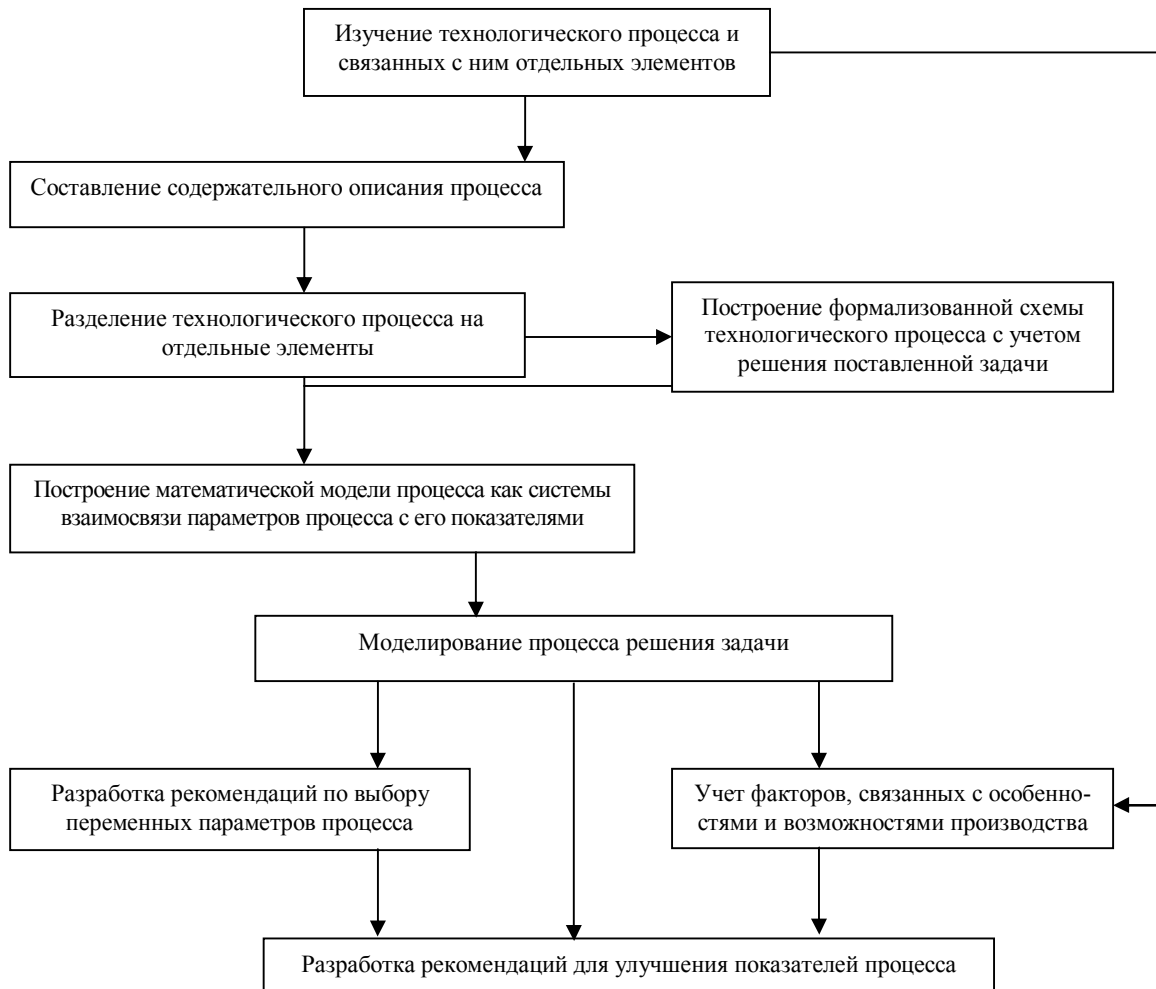


Рис. 1. Общая схема работ формализации технологического процесса

Формирование рабочей зоны карьера, разрабатывающего горизонтальное (пластовое) месторождение имеет свои отличительные особенности:

- рабочая зона включает пять участков: рабочий борт, отвальный борт, торцы карьера (со стороны выездной траншеи и противоположной стороны), дно карьера;

- размеры рабочей зоны изменяются в пространстве только в плане, т.е. глубина ее остается постоянной;

- на изменение размеров рабочей зоны оказывают влияние: применяемая система разработки, способ вскрытия месторождения и схема транспортирования вскрышных пород во внутренний отвал;

- между развитием фронта горных работ на вскрышном, добычным и отвальном участках рабочей зоны существует жесткая взаимосвязь;

- производственная мощность карьера определяется технологией разработки нижнего (надрудного) вскрышного уступа;

- развитие фронтов вскрышных, добычных и отвальных работ происходит при равном их годовом подвигании, соответствующим производственной мощности карьера.

Процесс создания математической модели процесса формирования рабочей зоны карьера заключается в следующем.

Производственная мощность карьера во взаимосвязи с основными параметрами системы разработки описывается известным выражением

$$Q_k = \dot{I}_{\bar{a}} L_{\bar{a}} h_{\bar{a}} \rho K_{\bar{e}\bar{c}\bar{a}}, \text{ т/год} \quad (3)$$

где P_0 – годовое подвигание фронта добычных работ, м; L_0 – длина фронта добычных работ, м; h_0 – мощность пласта полезного ископаемого, м; ρ – плотность полезного ископаемого, т/м³; $K_{изв}$ – коэффициент извлечения полезного ископаемого.

Из выражения (3) следует, что годовое подвигание фронта добычных работ можно определить по формуле:

$$\dot{I}_{\bar{a}} = \frac{Q_k}{L_{\bar{a}} h_{\bar{a}} \rho K_{\bar{e}\bar{c}\bar{a}}}, \text{ м/год} \quad (4)$$

В выражении (3) произведение $P_0 L_0$ представляет собой вскрытую в течение года площадь пласта полезного ископаемого, которая зависит от производительности комплекса машин, применяемого на надрудном уступе и, соответственно, его высоты H_{B1} :

$$\dot{I}_{\bar{a}} L_{\bar{a}} = \frac{Q_{\dot{y}1} - V_T}{H_{B1}}, \text{ м}^2 \quad (5)$$

где V_T – годовой объем вскрыши, обрабатываемой в торцах карьера, м³,

$$V_T = H_{B1}^2 \text{ctg} \gamma_{\bar{a}} \dot{I}_{\bar{a}}, \quad (6)$$

где $\gamma_{\bar{a}}$ – угол откоса вскрышного рабочего уступа.

С учетом выражений (3) и (4) производственную мощность карьера можно определить по формуле:

$$Q_k = \left(\frac{Q_{\dot{y}1} - H_{B1}^2 \text{ctg} \gamma_{\bar{a}} \dot{I}_{\bar{a}}}{H_{B1}} \right) h_{\bar{a}} \rho K_{\bar{e}\bar{c}\bar{a}}, \text{ м}^2 \quad (7)$$

Таким образом, производственная мощность карьера зависит от высоты надрудного вскрышного уступа и производительности оборудования, которое применяется для его отработки.

Из равенства (5) следует, что для условий действующего карьера, при необходимости изменения техно-

логической схемы отработки надрудного уступа, высота его (H_{B1}) должна соответствовать:

$$H_{B1} = \frac{\left[Q_k^2 + 4 Q_{\dot{y}1} \text{ctg} \gamma_{\bar{a}} (h_{\bar{a}} \rho K_{\bar{e}\bar{c}\bar{a}})^2 \right]^{\frac{1}{2}} - Q_k}{2 \dot{I}_{\bar{a}} \text{ctg} \gamma_{\bar{a}} h_{\bar{a}} \rho K_{\bar{e}\bar{c}\bar{a}}}, \quad (8)$$

Годовое подвигание фронта вскрышных работ на i -ом вскрышном уступе определяем по выражению:

$$\dot{I}_{Bi} = \frac{Q_{\dot{y}i}}{L_{Bi} H_{Bi}}, \text{ м/год}, \quad (9)$$

где $Q_{\dot{y}i}$ – производительность вскрышного оборудования на i -ом вскрышном уступе, м³/год; L_{Bi} и H_{Bi} – соответственно длина фронта работ и высота уступа, м.

С учетом основной закономерности открытой разработки горизонтальных месторождений – выполнения условий равенства годовых подвигов фронтов горных работ на всех уступах, приравняем выражения (4) и (9)

$$\frac{Q_k}{L_{\bar{a}} h_{\bar{a}} \rho K_{\bar{e}\bar{c}\bar{a}}} = \frac{Q_{\dot{y}i}}{L_{Bi} H_{Bi}}. \quad (10)$$

Длина фронта вскрышных работ на n -ом уступе определяется из выражения

$$L_{Bn} = L_{\bar{a}} + (\text{ctg} \beta_i + \text{ctg} \beta_{i,\bar{o}}) \left(\sum_{i=1}^{n-1} H_{Bi} + \frac{H_n}{2} \right), \text{ м}, \quad (11)$$

где $\beta_n, \beta_{n,\bar{o}}$ – соответственно углы откосов нерабочих бортов в торцах карьера, град.

Из выражения (3) с учетом (5) определяется высота вскрышного уступа на любом рабочем горизонте:

$$H_{Bn} = \frac{Q_{\dot{y}i}}{\dot{I}_{\bar{a}} \left[L_{\bar{a}} + (\text{ctg} \beta_i + \text{ctg} \beta_{i,\bar{o}}) \sum_{i=1}^{n-1} H_{Bi} \right]}, \text{ м} \quad (12)$$

Высота уступов, а также типы применяемого основного горно-транспортного оборудования на вскрышном участке рабочей зоны карьера, оказывают влияние на величину углов откоса рабочего, нерабочих (в торцах) и отвального бортов карьера.

Средняя длина транспортирования вскрышных пород во внутренний отвал с n -го вскрышного горизонта определяется из выражения:

$$L_{\bar{o}i} = 0,5(L_{\hat{a}n} + L_{\hat{i}i}) + L_{\bar{o}i}, \text{ м} \quad (13)$$

где L_{on} – длина фронта отвальных работ на n -ом горизонте, м; L_{tn} – длина n -го горизонта в торце карьера, м,

Длина n -го горизонта в торце карьера описывается выражением:

$$L_{\bar{o}i} = a + \sum_{i=1}^{n-1} H_{Bi} (\text{ctg} \varphi + \text{ctg} \beta_{\bar{o}\hat{a}c}) + \frac{H_{Bn}}{2} (\text{ctg} \beta_i + \text{ctg} \beta_{i,\bar{o}}), \quad (14)$$

где a – расстояние между нижними бровками добычного уступа и отвала; φ и β_{pez} – соответственно результирующие углы откосов рабочего и нерабочего бортов карьера, град.

Среднее расстояние транспортирования вскрышных пород во внутренний отвал по карьеру в целом зависит от длины рабочей зоны по дну $L_{\bar{o}}$, мощностей вскрыши H_B и полезного ископаемого $h_{\bar{o}}$, а также от углов откосов бортов карьера и определяется по формуле:

$$l_{\bar{o}\hat{a}}^{\bar{n}\bar{o}} = [L_{\bar{a}} + 2(0,5H_{\bar{a}} + h_{\bar{a}})(\text{ctg} \beta_i + \text{ctg} \beta_{i,\bar{a}})] + [(0,5H_{\bar{a}} + h_{\bar{a}}) \cdot (\text{ctg} \varphi + \text{ctg} \beta_{\bar{o}\hat{a}c}) + \bar{a}] \quad (15)$$

Первое слагаемое приведенной формулы отражает суммарное среднее расстояние транспортирования во вскрышной и отвальной зонах, т.е. $l_{\dot{o}}+l_o$, второе – расстояние l_m в торце карьера.

Величина $l_{\dot{o}\dot{o}}^{\dot{n}\dot{o}}$ и протяженность транспортных коммуникаций $\Sigma l_{m\kappa}$ для конкретного месторождения (при постоянных L_o и H_B) изменяются при изменении лишь углов откосов бортов. Поэтому в математической модели используются формулы определяющие величины приращений средних расстояний транспортирования.

Приращение среднего расстояния $\Delta l_{\dot{o}\dot{o}}^{\dot{n}\dot{o}}$ определяется как

$$\Delta l_{\dot{o}\dot{o}}^{\dot{n}\dot{o}} = \Delta l_{\dot{a}} + \Delta l_{\dot{o}} + \Delta l_i, \text{ м} \quad (16)$$

где $\Delta l_{\dot{a}}$ и Δl_o - соответственно приращения расстояний транспортирования во вскрышной и отвальной зонах, м; Δl_m - приращение расстояния транспортирования в торце карьера (со стороны выездных траншей или съездов), м.

$$\Delta l_{\dot{a}} = (0,5H_{\dot{a}} + h_{\dot{a}}) \cdot (\text{ctg } \varphi - \text{ctg } \varphi_{\dot{a}}); \quad (17)$$

$$\Delta l_{\dot{o}} = (0,5H_{\dot{o}} + h_{\dot{o}}) \cdot (\text{ctg } \beta_i - \text{ctg } \beta_{i,\dot{a}}); \quad (18)$$

$$\Delta l_i = (0,5H_{\dot{a}} + h_{\dot{a}}) \cdot (\text{ctg } \beta_{\dot{o}\dot{a}\dot{c}} - \text{ctg } \beta_{\dot{a}}), \quad (19)$$

где $\varphi_e, \beta_e, \beta_{н.е.}$ - соответственно максимально возможные углы откосов рабочего борта карьера, отвала и торца карьера, град.

Рассмотренные взаимосвязи параметров системы разработки, параметров рабочей зоны карьера, производительности вскрышных комплексов оборудования, производственной мощности карьера представлены на рис. 2 в виде математической модели.

1.	$Q_k = \dot{I}_{\dot{a}} L_{\dot{a}} h_{\dot{a}} \rho K_{\dot{e}\dot{c}\dot{a}}$ - производственная мощность карьера, т/год;
2.	$\dot{I}_{\dot{a}} = \frac{Q_k}{L_{\dot{a}} h_{\dot{a}} \rho K_{\dot{e}\dot{c}\dot{a}}}$ - годовое подвигание фронта добычных работ, м;
3.	$\dot{I}_{B_i} = \frac{Q_{\dot{y}i}}{L_{B_i} H_{B_i}}$ - годовое подвигание фронта вскрышных работ, м;
4.	$\dot{I}_{\dot{a}} = \dot{I}_{B_1} = \dot{I}_{B_2} = \dot{I}_{B_3} = \dots \dot{I}_{B_i} = \dots \dot{I}_n$ - условие равенства годовых подвиганий фронтов горных работ на уступах;
5.	$H_{B_1} = \frac{[Q_k^2 + 4Q_{\dot{y}1} \text{ctg } \gamma_e (h_{\dot{a}} \rho K_{\dot{e}\dot{c}\dot{a}})^2]^{\frac{1}{2}} - Q_k}{2 \dot{I}_{\dot{a}} \text{ctg } \gamma_e h_{\dot{a}} \rho K_{\dot{e}\dot{c}\dot{a}}}$ - высота надрудного уступа, м;
6.	$L_{B_n} = L_{\dot{a}} + (\text{ctg } \beta_i + \text{ctg } \beta_{i,\dot{o}}) \left(\sum_{i=1}^{n-1} H_{B_i} + \frac{H_n}{2} \right)$ - длина фронта вскрышных работ на n-ом уступе, м;
7.	$H_{B_n} = \frac{Q_{\dot{y}i}}{\dot{I}_{\dot{a}} \left[L_{\dot{a}} + (\text{ctg } \beta_i + \text{ctg } \beta_{i,\dot{o}}) \sum_{i=1}^{n-1} H_{B_i} \right]}$ - высота вскрышного уступа на любом рабочем горизонте, м;
8.	$\beta_i = \arctg \frac{H_{\dot{a}}}{\text{ctg } \gamma_{i.e} \sum_{i=1}^{n_{\dot{a}}} H_{\dot{a}_i} + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{n_{\dot{a}}} H_{\dot{a}_i}}$ - угол откоса нерабочего борта в торцах карьера, град.;
9.	$\beta_n \leq \beta_{н.е.}$;

10.	$\beta_{i,\dot{o}} = \arctg \frac{H_{\dot{a}}}{\text{ctg } \gamma_{i.e} \sum_{i=1}^{n_{\dot{a}}} H_{\dot{a}_i} + \sum_{i=1}^{n_{\dot{a}-1}} \dot{a}_{\dot{o}\dot{o}_i}}$ - угол откоса нерабочего борта в торцах выездной траншеи карьера, град.;
11.	$\varphi = \arctg \frac{H_{\dot{a}} + h_{\dot{a}}}{\text{ctg } \alpha_e \sum_{j=1}^{n_{\dot{a}}} h_{\dot{a}_j} + \sum_{j=1}^{n_{\dot{a}-1}} \dot{O}_{\dot{a}_j} + \text{ctg } \gamma \sum_{i=1}^{n_{\dot{a}}} H_{\dot{a}_i} + \sum_{i=1}^{n_{\dot{a}}} \dot{O}_{\dot{a}_i}}$ - угол откоса рабочего борта карьера, град.;
12.	$\varphi_{\dot{a}} = \arctg \frac{H_{\dot{a}} + h_{\dot{a}}}{\text{ctg } \alpha_e \sum_{j=1}^{n_{\dot{a}}} h_{\dot{a}_j} + \text{ctg } \gamma_e \sum_{i=1}^{n_{\dot{a}}} H_{\dot{a}_i} + \sum_{i=1}^{n_{\dot{a}-1}} \dot{O}_{i,\dot{a}_i}}$ - максимально возможный угол откоса рабочего борта карьера, град.;
13.	$\beta_e = 1785,7 / (33,6 + H_o)$ - максимально возможный угол откоса отвала, град.;
14.	$\beta_{\text{рез}} \leq \beta_e$;
15.	$K_{\dot{A}} = \frac{(\text{ctg } \varphi_e + \text{ctg } \beta_e) \cdot \text{ctg } \beta_{i,\dot{a}}}{(\text{ctg } \varphi + \text{ctg } \beta_{\dot{o}\dot{a}\dot{c}}) \cdot \text{ctg } \beta_i}$ - показатель концентрации горных работ [7];
16.	$\Delta l_{\dot{a}} = (0,5H_{\dot{a}} + h_{\dot{a}}) \cdot (\text{ctg } \varphi - \text{ctg } \varphi_{\dot{a}})$ - приращения расстояний транспортирования во вскрышной зоне, м;
17.	$\Delta l_{\dot{o}} = (0,5H_{\dot{o}} + h_{\dot{o}}) \cdot (\text{ctg } \beta_i - \text{ctg } \beta_{i,\dot{a}})$ - приращение расстояния транспортирования в торце карьера (со стороны выездных траншей или съездов), м.
18.	$\Delta l_i = (0,5H_{\dot{a}} + h_{\dot{a}}) \cdot (\text{ctg } \beta_{\dot{o}\dot{a}\dot{c}} - \text{ctg } \beta_{\dot{a}})$ - приращения расстояний транспортирования в отвальной зоне, м;
19.	$\Delta l_{\dot{o}\dot{o}}^{\dot{n}\dot{o}} = \Delta l_{\dot{a}} + \Delta l_{\dot{o}} + \Delta l_i$ - приращение среднего расстояния транспортирования;
20.	$\Delta \Sigma l_{\dot{o},\dot{e}} = 2 \cdot \Delta l_{\dot{o}\dot{o}}^{\dot{n}\dot{o}}$ - приращение суммарной протяженности транспортных коммуникаций, м.

Рис. 2. Математическая модель формирования рабочей зоны карьера

Разработанная математическая модель взаимосвязей параметров системы разработки месторождения, параметров рабочей зоны карьера, его производственной мощности, а также производительности основного горно-транспортного оборудования позволяет более детально и углубленно исследовать эффективность применения той или иной технологии производства вскрышных и добычных работ в условиях эксплуатируемых и вновь осваиваемых горизонтальных и пологопадающих месторождений.

Выводы

Разработана математическая модель рабочей зоны карьера при отработке горизонтальных и пологопадающих месторождений, позволяющая детально исследовать эффективность применения той или иной технологии производства вскрышных и добычных работ в условиях эксплуатируемых и вновь осваиваемых россыпных месторождений Украины (Мальшевское, Волчанское, Иршанское и др. месторождения).

Впервые при освоении горизонтальных и пологопадающих месторождений сформулированы отличительные особенности рабочей зоны карьера, установлены взаимосвязи между параметрами системы разработки, рабочей зоны карьера и его производственной мощностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Таран В.А., Брудник С.С., Кофанов Ю.Н. Математические вопросы автоматизации производственных процессов.- М.: Высшая школа, 1968.- 216 с.
2. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем.- М.: Наука, 1968.-365 с.
3. Новожилов М.Г., Эскин В.С., Корсунский Г.Я. Теория и практика открытой разработки горизонтальных месторождений.- М.: Недра, 1978.- 328 с.
4. Барсуков М.И. Повышение эффективности поточной технологии на карьерах с мягкими породами.- Киев: Наукова думка, 1984.- 232 с.
5. Полищук А.К., Полищук Г.К., Михайлов А.М. Оптимизация развития открытых горных работ.- М.: Недра, 1976.- 159 с.
6. Хохряков В.С., Саканцев Г.Г., Яшкин А.З. Экономико-математическое моделирование и проектирование карьеров.- М.: Недра, 1977.- 200 с.