

Сериккали Куаталиевич КАБИЕВ

Павел Павлович ПАЛЕВ

Карагандинский научно-исследовательский,
проектно-конструкторский и эксперимен-
тальный институт Гипроуглехормаш
Караганда, СССР

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРОХОДЧЕСКИХ КОМБАЙНОВ

Резюме. Оптимизация исполнительного органа произво-
дится в два этапа. Вначале с помощью метода оптимума
номинала определяется диаметр исполнительного органа,
затем для найденного диаметра исполнительного органа
решается задача многокритериальной оптимизации гео-
метрических и кинематических параметров исполнитель-
ного органа. Дан пример оптимизации исполнительного
органа комбайна "Урал-20".

I. ОБЪЕКТ ОПТИМИЗАЦИИ

Объектом оптимизации являются исполнительные органы проход-
ческих комбайнов типа "Урал-20" и "Урал-10", созданных инсти-
тутом Гипроуглехормаш и Копейским машиностроительным заводом
им. С. М. Кирова. Комбайны типа "Урал-20" (рис. 1) предназначены
для проведения горизонтальных и наклонных (до 12°) подготовитель-
ных выработок и механизации выемки калийных руд в камерах на
пластах мощностью 3,1-3,7 м. Комбайны оснащены планетарно-диско-
вым исполнительным органом, кинематическая схема которого показана
на рис. 2. Проведение подготовительных выработок с различными
диаметрами поперечного сечения достигается изменением расстояния
от оси вращения режущего диска 1 до оси вращения исполнительного
органа путем замены проставок на ллече 2. Центральная часть забоя
разрушается забурником, состоящим из двух плоских дисков 6.
Площади поперечного сечения выработки δ и β разрушаются с помощью
бермовых фрез и верхнего отбойного устройства.

Комбайны типа "Урал-10" (рис. 3) предназначены для проведения
горизонтальных и наклонных (до 12°) подготовительных выработок и
очистной выемки калийных руд в камерах на пластах мощностью

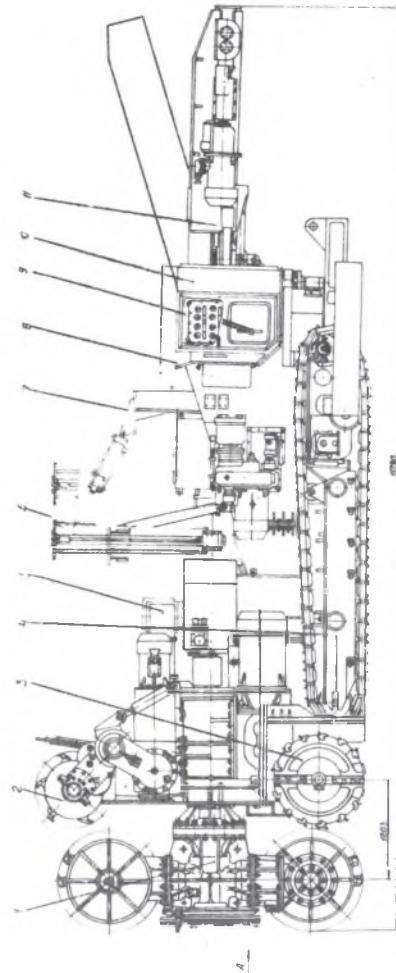


Рис. I. Комбайн "Урал-20"

1 - исполнительный орган планетарного типа, 2 - верхнее отбойное устройство, 3 - бурмовый орган, 4 - гусеничный ход, 5 - средства пылеподавления, 6 - устройство для бурения штрупов, 7 - насосная станция, 8 - гидравлический пульт, 9 - электрическая система, 10 - кабина машиниста, 11 - скребковый конвейер

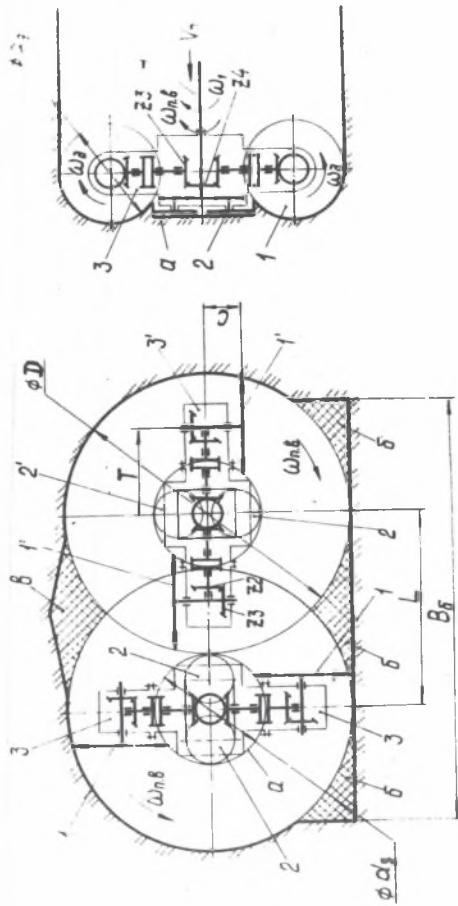


Рис.2. Кинематическая схема исполнительного органа комбайна "Урал-20"
 1 - режущие диски, 2 - режущие диски забурника,
 3 - рукояти, а, б, в - плоскости поперечного сечения
 выработки, обрабатываемые забурником, боровыми
 фрезами и отбойным устройством

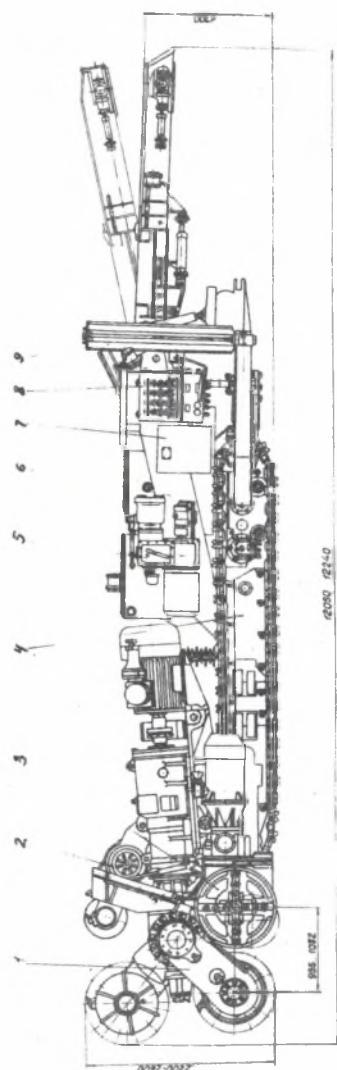


Рис.3. Комбайн "Урал-ЛО"

1 - исполнительный орган планетарного типа, 2 - верхнее отбойное устройство, 3 - бермовый орган, 4 - гусеничный ход, 5 - средства пылеподавления, 6 - скребковый конвейер, 7 - гидравлический пульт, 8 - электрическая система, 9 - установка для бурения шпуров.

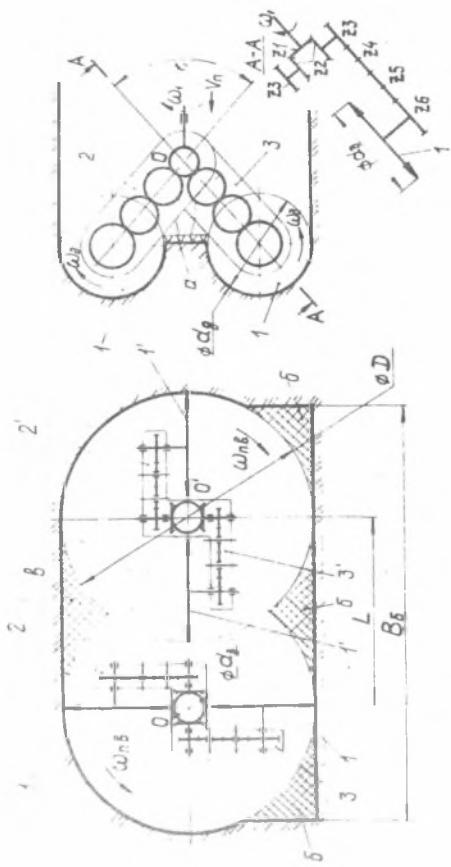


Рис. 4. Кинематическая схема исполнительного органа

комбайна "Урал-10".
1 - режущие диски, 2, 3 - рукояти, а, б, в - площасти поле-
речного сечения выработки, обрабатываемые зуборезом,
бермовым органом и отбойным устройством

2,2±2,6 м. Комбайны оснащены исполнительным органом, кинематическая схема которого показана на рис.4. Изменение диаметра проводимых выработок достигается поворотом рукоятей 2, на которых размещены режущие диски I. Положение исполнительного органа относительно почвы выработки фиксируется с помощью качающейся платформы. Центральная часть площади поперечного сечения выработки 5 разрушается резцами, установленными на корпусе редуктора. Площади поперечного сечения выработки δ и δ' разрушаются бермовыми фрезами и верхним отбойным устройством.

2. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ДИАМЕТРА ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА

Анализ геологоразведочных данных о калийных пластах крупнейших – Верхнекамского и Старобинского – месторождений показал, что мощность пластов, подлежащих выемке, изменяется в широких пределах. Так, для пластов Верхнекамского месторождения коэффициент вариации вынимаемой мощности изменяется от 0,114 до 0,358 и для пластов Старобинского месторождения – от 0,140 до 0,406. Поскольку на рудниках выемка руды комбайнами производится на нескольких пластах, то возникает задача определения оптимального значения диаметра исполнительного органа.

Пусть эмпирическое распределение вероятностей вынимаемой мощности пласта имеет вид, показанный на рис.5. При выборе диаметра исполнительного органа интуитивным стремлением является назначение диаметра исполнительного органа равным среднему значению мощности пласта $D = \bar{m}$. При этом будут выделены две области распределения вероятностей мощности пласта. Область I определяет работу комбайна на участках пласта с $m < D$, когда будет иметь место дополнительное засорение руды, что приведет к издержкам производства. Область 2 определяет работу комбайна на участках пласта с $m > D$, когда будут иметь место потери руды, что также связано с издержками производства. Очевидно, назначение диаметра исполнительного органа равным среднему значению мощности пласта будет представлять наилучшее решение только в том случае, если распределение вероятностей мощности пласта будет симметричным, а издержки, связанные с дополнительным обогащением руды, будут соответствовать стоимости навыбранной руды. Построение эмпирических распределений вынимаемой мощности пластов показало, что они проявляют свойства асимметрии и

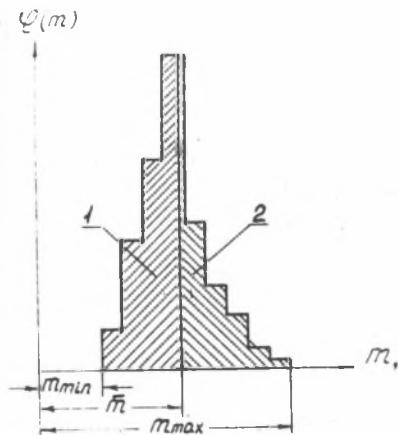


Рис.5. Эмпирическое распределение вероятностей вынимаемой мощности калийного пласта.

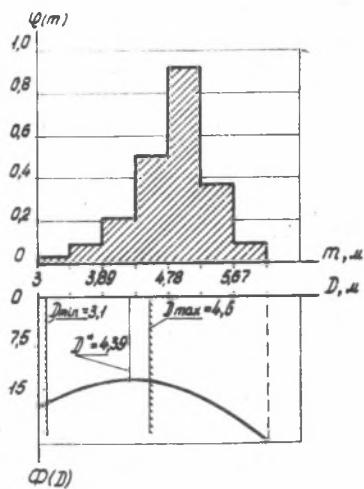


Рис.6. Определение оптимального значения диаметра исполнительного органа комбайна "Урал-20А" при выемке калийного пласта "Красный-П".

экспесивности, а себестоимость I т обогащенной руды значительно превосходит возможную себестоимость I т невыбранной руды [I]. Очевидно диаметр исполнительного органа будет оптимальным в том случае, когда суммарные издержки производства будут минимальными. Воспользовавшись методом оптимума номинала [2], функцию эффективности для выбора диаметра исполнительного органа примем в виде

$$\Phi(D) = \int_{m_{min}}^D \int_{\alpha}^{\infty} C_r(\alpha, m) \varphi(m, \alpha) d\alpha dm + \int_D^{\infty} \int_{\alpha}^{\infty} U_n(\alpha) D^{-1} m \varphi(m, \alpha) d\alpha dm, \quad (1)$$

где $C_r(\alpha, m)$ - функция себестоимости I т руды, требующей дополнительного обогащения; $U_n(\alpha)$ - функция возможной себестоимости I т невыбранной руды; $\varphi(m, \alpha)$ - совместная плотность распределения вероятностей мощности пласта (m) и содержания в руде хлористого калия (α).

Математическое решение задачи выбора оптимального значения диаметра исполнительного органа состоит в следующем: требуется найти точку $D^* \in \{m_{min}, m_{max}\}$ такую, что

$$D^* = \arg \min \Phi(D); \quad D \in \{m_{min}, m_{max}\} \quad (2)$$

при налагаемых конструктивных ограничениях

$$D_{min} \leq D \leq D_{max} \quad (3)$$

и ограничениях, вытекающих из горно-геологических условий

$$m_{min} \leq m \leq m_{max}, \quad (4)$$

$$\alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}.$$

В соответствии с методикой [I]

$$C_r(\alpha, m) = \frac{C_d + C'}{\beta_0'' + \beta_1'' \frac{am}{D} + \beta_2'' \left(\frac{am}{D} \right)^2} + C'', \quad (5)$$

$$U_n(\alpha) = \beta_0 + \beta_1 \alpha + \beta_2 \alpha^2. \quad (6)$$

В (5) C_d - себестоимость I т рудной массы; C' , C'' , β_0'' , β_1'' и β_2'' - эмпирические константы.

Постоянные β_0 , β_1 и β_2

$$\beta_0 = C_{оп} \alpha_t^{-1} K_3 (\lambda - K_4) \cdot 10^{-2},$$

$$\beta_1 = C_{оп} \alpha_t^{-1} K_1 \cdot 10^{-2},$$

$$\beta_2 = C_{оп} \alpha_t^{-1} K_2 \cdot 10^{-2},$$

где $C_{оп}$ – оптовая цена 1 т руды, содержащей 95% мелкозернистого калия; α_t – содержание в руде флотационного мелкозернистого калия; λ – содержание нерастворимого осадка в рудной массе; K_1 , K_2 , K_3 – эмпирические константы.

С учетом (5) и (6), и представив совместную плотность распределения вероятностей в виде $\varphi(m, \alpha) = \varphi_1(m) \varphi_2(\alpha/m)$, где $\varphi_2(\alpha/m)$ – условная плотность распределения вероятностей содержания хлористого калия, функцию эффективности можно записать в виде

$$\begin{aligned} \Phi(D) = & (C_0 + C') \int_{m_{min}}^D \int_0^\infty \frac{\varphi(m, \alpha) d\alpha dm}{\beta_0'' + \beta_1'' \frac{dm}{D} + \beta_2'' \left(\frac{dm}{D} \right)^2} + \\ & + \beta_0 \int_D^{m_{max}} \frac{m}{D} \varphi_2(m) dm + \beta_1 \int_D^{m_{max}} \frac{m}{D} \mu_1 \left(\frac{\alpha}{m} \right) \varphi_2(m) dm + \\ & + \beta_2 \int_D^{m_{max}} \frac{m}{D} \mu_2 \left(\frac{\alpha}{m} \right) \varphi_2(m) dm + C'' [F(D) - F(m_{min})], \end{aligned} \quad (?)$$

где $F(m)$ – функция распределения вероятностей вынимаемой мощности пласта, $\mu_1(\alpha/m)$, $\mu_2(\alpha/m)$ – соответственно первый и второй условные моменты содержания хлористого калия.

Численное решение задачи определения оптимального значения диаметра исполнительного органа производится с помощью метода, основанного на информационно-статистической теории минимизации многоэкстремальных задач. Алгоритм решения изложен в [3].

В качестве примера рассмотрим задачу выбора оптимального значения диаметра исполнительного органа комбайна "Урал-20А" для выемки калийного пласта "Красный-П" в условиях рудника БКРУ-2. На рис.6 показана эмпирическая плотность распределения

вероятностей вынимаемой мощности пласта, и приведены результаты минимизации функции эффективности. Численные значения коэффициентов, входящих в формулу (7) согласно [1], следующие: $C' = 2,18$; $C'' = 4,11$; $\kappa_1 = 59,41$; $\kappa_2 = 0,8$; $\kappa_3 = 53,8$; $\kappa_4 = 1,13$; $C_d = 2,06$; $a_7 = 95\%$; $\lambda = 3,95$; $U_{op} = 29$.

Конструктивные ограничения: $D_{min} = 3,1$; $D_{max} = 4,5$. Наименьшее значение функции эффективности, соответствует диаметру исполнительного органа, равному 4,39 м.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ КОНСТРУКТИВНЫХ И КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА

Для выбора параметров назначаются следующие критерии: удельные энергозатраты на разрушение забоя забурником - E , площадь поперечного сечения стружки - S и путь резания, отнесенный к единице объема разрушенного массива - L . Выражения для этих критериев зависят от конструкции исполнительного органа.

Для исполнительного органа комбайнов "Урал-20A" (рис.7)

$$E = \frac{\mathcal{E}_d [\mathcal{A}^2 + (C - \gamma_d)^2]}{\mathcal{E}_{p,d} [D^2 - \mathcal{A}^2 - (C - \gamma_d)^2]}, \quad (8)$$

$$S' = \frac{1}{S} = \frac{30 \kappa_d \omega_d Z_d}{2 \pi D^2 V_n \sin \varphi_o \sqrt{\mathcal{A}^2 + (C - \gamma_d \cos \varphi_o)^2}}, \quad (9)$$

$$L = \frac{4 \int_{\varphi_{ex}}^{\varphi_{max}} \sqrt{\left(\frac{dx}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\varphi}\right)^2} d\varphi}{\pi D V_n}, \quad (10)$$

где \mathcal{E}_d , $\mathcal{E}_{p,d}$ - удельные энергозатраты на разрушение массива соответственно забурником и режущими дисками; \mathcal{A} , C - соответственно боковое и радиальное смещение оси режущего диска (рис.7); γ_d - радиус режущего диска; κ_d - число режущих дисков; ω_d - угловая скорость режущего диска; Z_d - число резцов на режущем диске; V_n - скорость подачи комбайна; φ_o - угол поворота режущего диска, соответствующий максимальному значению

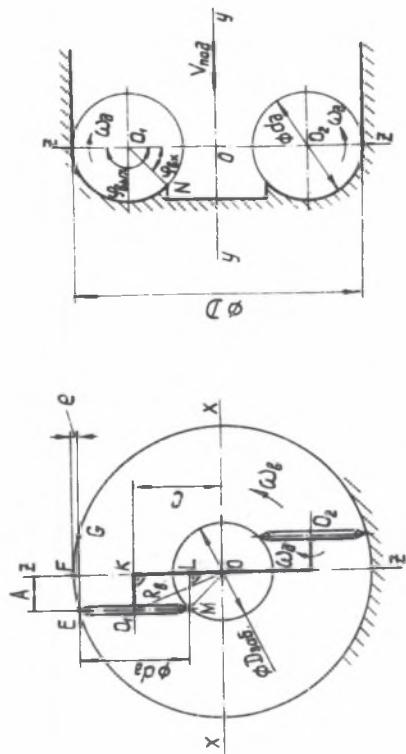


Рис. 7. К выводу критериев оптимизации параметров исполнительного органа

площади поперечного сечения стружки; $\varphi_{\theta x}$, $\varphi_{\theta y/x}$ – соответственно угол входа и угол выхода резцов из контакта с массивом; x , y , z – координаты резцов.

Значения углов $\varphi_{\theta x}$ и $\varphi_{\theta y/x}$

$$\varphi_{\theta x} = \arccos \frac{c - \sqrt{\gamma_d^2 - A^2}}{\gamma_d}, \quad \varphi_{\theta y/x} = 180^\circ.$$

Координаты резцов определяются из уравнений движения режущего инструмента

$$\begin{aligned} X &= A \cos \frac{\varphi}{i} + (c - \gamma_d \cos \varphi) \sin \frac{\varphi}{i}, \\ Y &= \gamma_d \sin \varphi, \\ Z &= -A \sin \frac{\varphi}{i} + (c - \gamma_d \cos \varphi) \cos \frac{\varphi}{i}, \end{aligned} \quad (\text{II})$$

где i – отношение угловых скоростей относительного и переносного вращений.

При выводе уравнений движения режущего инструмента координатные оси OX и OZ располагались в плоскости переносного вращения, а ось OY совпадает с направлением подачи комбайна.

Для исполнительного органа комбайнов "Урал-10А" назначаются два критерия S' и L

$$\begin{aligned} S' &= \frac{1}{S} = \frac{30 \kappa_d \omega_a z_d}{2 \pi^2 V_n \sin \varphi_0 (c - \gamma_d \cos \varphi_0)}, \\ L &= \frac{4 \int_0^{\varphi_{\theta y/x}} \sqrt{\left(\frac{dx}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\varphi}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\varphi}\right)^2}}{\pi D V_n}. \end{aligned} \quad (\text{I2})$$

Математическое решение задачи выбора параметров исполнительного органа формулируется следующим образом: параметры выбираются из условия

$$E(\tilde{x}) = \min_{x \in X} E(x); \quad S'(\tilde{x}) = \min_{x \in X} S'(x); \quad L(\tilde{x}) = \min_{x \in X} L(x) \quad (\text{I3})$$

при следующих функциональных

$$D_d \leq \frac{4 V_{p\max}}{\omega_d \delta} + \delta,$$

$$Z_d \leq \frac{2 \pi l \gamma_d}{l_k},$$

$$\omega_d \gamma_d \leq V_{p\max},$$

(14)

$i Z_d = n + 0,65 \pm 0,5$, где n - целое четное число,

$$V_n = \frac{Q_{u.o.}}{F},$$

$$h_{\max} = \frac{V_{p\max}}{n_g K_d} \sin \varphi \leq l_{\text{безл}}$$

и параметрических ограничениях:

$$0 \leq C_{min} \leq C \leq C_{max},$$

$$0 \leq \gamma_{dmin} \leq \gamma_d \leq \gamma_{dmax},$$

$$0 \leq \omega_{dmin} \leq \omega_d \leq \omega_{dmax}.$$

В (14) и (15) $V_{p\max}$ - максимальное значение скорости резания; D_d - диаметр дисков забурников; δ - зазор между дисками; l_k - длина кулака режущего инструмента;

α - производительность; F - площадь поперечного сечения выработки; $l_{\text{безл}}$ - радиальный вылет резца; n_g - частота вращения переносного движения.

Численное решение оптимального выбора параметров исполнительного органа производится с помощью метода Соболя И.М. и Статникова Р.Б. [4].

В качестве примера приведены результаты выбора оптимальных значений параметров исполнительного органа комбайна "Урал-ЗОКС". При расчете были использованы следующие исходные данные:

$$8,05 \leq i \leq 12,05; \quad V_p = 2,0 \div 2,5 \text{ м/с}.$$

На рис.8 показаны графики зависимости оптимальных значений: радиального смещения C , угловой скорости ω_d и радиуса режущего диска γ_d . Найденные оптимальные значения параметров C , ω_d и γ_d позволяют определить все остальные параметры исполнительного органа по зависимостям, приведенным в [5].

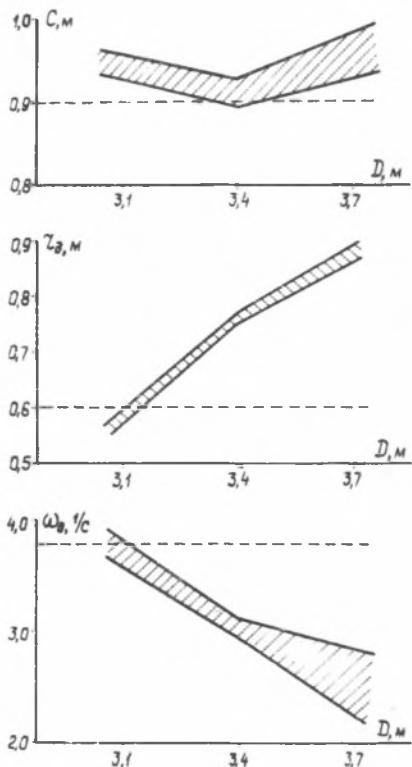


Рис.8. Графики зависимости оптимальных значений: радиального смещения - C , радиуса режущего диска - Z_0 и угловой скорости диска ω_0 от диаметра исполнительного органа (применительно к комбайну "Урал-ЗОКС")

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Методика определения годового экономического эффекта от создания и внедрения новой техники, изобретений и рационализаторских предложений в химической промышленности. М.: Минхимпром СССР, 1978.
- [2] Метод оптимума номинала и его применение./Г.В.Горелова, В.В.Здор, Д.В.Свечарник. М.: Энергия, 1970.
- [3] Стронгин Р.Г. Численные методы в многоэкстремальных задачах. М.: Наука, 1978.
- [4] Соболь И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981.
- [5] Солод В.И., Заиков В.И., Первов К.М. Горные машины и автоматизированные комплексы. М.: Недра, 1981.

WIELOKRYTERIALNA OPTYMALIZACJA ORGANU
URABIAJĄCEGO KOMBAJNÓW CHODNIKOWYCH

S t r e s z c o z e n i e

Optymalizacja organu urabiającego przebiega w dwóch etapach. Najpierw za pomocą metody "optimum wartości nominalnej" określa się średnicę organu urabiającego, a następnie dla wyznaczonej średnicy rozwiązuje się zadanie wielokryterialnej optymalizacji geometrycznych i kinematycznych parametrów organu urabiającego.

W referacie podano przykład optymalizacji organu urabiającego kombajnu "Ural - 20".

MULTICRITERIA OF OPTIMIZATION OF THE CUTTING
DRUM OF HEADING MACHINES

S u m m a r y

Optimization of the cutting drum is done in two stages. First with the help of the "optimum nominal value" method the diameter of the cutting drum is determined and next for the determined diameter optimum geometric and kinetic parameters of the cutting drum are computed.

The paper presents optimization of the cutting drum of "Ural - 20" heading machine.