

УДК 622.271.324

**В.И. Белозеров**

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ВСКРЫТИЯ РАБОЧИХ ГОРИЗОНТОВ КАРЬЕРА**

*Разработаны зависимости для установления среднего расстояния перемещения горной массы на плоскости рабочего горизонта к вскрывающей выработке. Установлены общие зависимости и рекомендации для определения оптимального положения вскрывающей выработки по критерию минимизации затрат энергии на перемещение пород.*

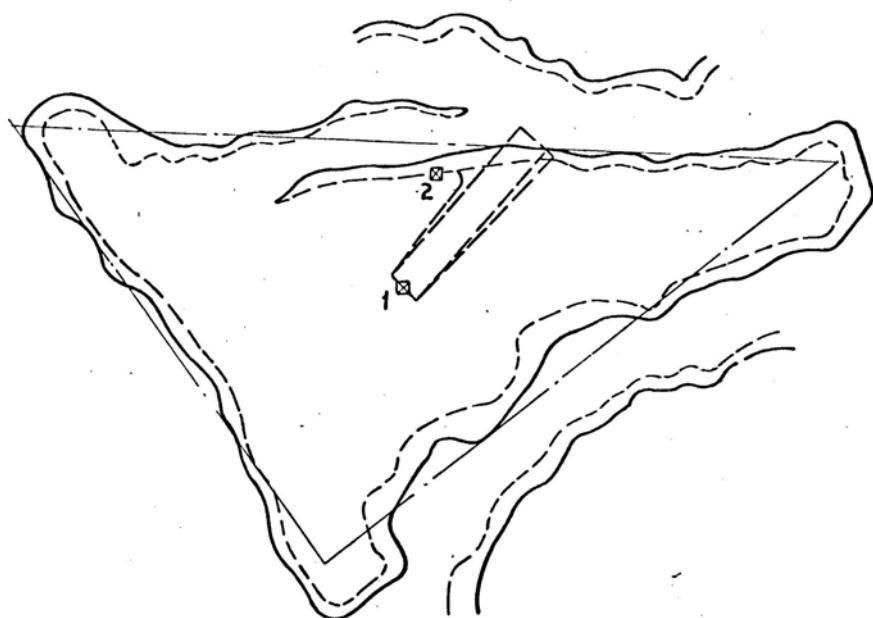
*Ключевые слова: карьер, рабочий, горизонт, оптимизация, расстояние, энергозатраты.*

---

**В** скрытие рабочих горизонтов карьера принято проводить с учетом геометрических факторов: рельефа поверхности и кровли залежи и уменьшения объема необходимых для вскрытия горных работ. При использовании автотранспорта существенным становится определение положения вскрывающих выработок, которое обеспечило бы наименьшее расстояние транспортирования пород, а, следовательно, энергетические и стоимостные затраты. В данной публикации представлен математический аппарат для определения такого положения пункта примыкания вскрывающей выработки к рабочему горизонту, которое соответствовало бы этому требованию при перемещении горной массы по рассматриваемому горизонту.

Впервые аналогичная задача при подземном способе добычи рассмотрена академиком Л.Д. Шевяковым [1] для определения места заложения подъемного ствола при вскрытии шахтного поля по условию минимальной «работы транспорта» по продольным к этому стволу. В случае непрерывного и неравномерного распределения полезного ископаемого математическая постановка задачи была представлена в виде: грузы распределены по горизонтальной линии, на которой и устанавливается положение искомой точки. Установлено, что «оптимальный пункт своза (ОПС)» находится на пересечении этой линии с перпендикулярной ей прямой, делящей запасы месторождения пополам. Автором подчеркивается, что ОПС есть особая точка, не совпадающая с центром тяжести грузов.

В отличии от подземных работ схемы транспортирования пород при вскрытии рабочего горизонта карьера изменяются. В течение первого этапа, представленного в плане фигурой  $F$  (рис. 1), породы могут перемещаться со всей площади к точке своза — вскрывающей выработке (наклонной траншеей или рудоспуском) при использовании автотранспорта по траекториям, принимаемым за прямолинейные. Во второй этап, после вскрытия нижележащего горизонта, рассматриваемый горизонт принимает форму кольца, и грузы перемещаются по кривой вдоль контура горизонта. В этом случае движение груза подчиняется закономерностям, установленным акад. Шевяковым, с некоторыми особенностями, обусловленными тем, что траектория движения груза является замкнутой линией [2]. Нами рассматривается начальный этап развития горизонта с



**Рис. 1. Оптимальный пункт своза горной массы на горизонте — т. 1 (т. 2 — ближайшая на контуре выработанного пространства)**

перемещением грузов по прямой. Выводы могут быть использованы при вскрытии карьерного поля вертикальной выработкой, например, рудо — или породоспуском.

Постановка задачи формулируется следующим образом: требуется найти такую точку с искомыми координатами  $(x_0, y_0)$ , чтобы суммарная величина перемещения непрерывно и равномерно распределенных грузов в эту точку со всей площади горизонтальной фигуры  $F$  (напр. в тоннокилометрах или кубокилометрах) была минимальна.

Суммарная величина перемещений груза с фигуры  $F$  в заданную точку  $(x_0, y_0)$  («транспортной работы») выражается двойным интегралом:

$$A(x_0, y_0) = \iint_F m(x, y) \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} .$$

Задача сводится к поиску  $(x_0, y_0) \rightarrow \min A(x_0, y_0)$ .

Промежуточной задачей является определение среднего расстояния перемещения пород по горизонту со всей фигуры в заданную точку. Так как груз распределен равномерно, то на каждой единице площади  $df$  размещается одинаковое количество груза  $dm$ . Поэтому переходим от зависимостей для грузов к зависимостям для площади. Тогда среднее расстояние  $S_c$  устанавливается из общей зависимости:

$$l_c = \iint_F l df / F ,$$

где  $F$  — площадь горизонта в первый период вскрытия.

Для получения выражения в развернутом виде, пригодном для практического использования, разобьем геометрическую фигуру с площадью  $F$  на элементарные площадки  $df$ . Расстояние перемещения для элементарной площадки с координатами  $x, y$  равно:

$$l(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Применим теорему о среднем [3]

$$\iint l(x, y) df = l_{cp} F,$$

где  $F = \iint_F dx dy$  — площадь фигуры.

Среднее арифметическое значение будет равно:

$$l_{cp} = \frac{\iint_F \sqrt{x^2 + y^2} dx dy}{\iint_F dx dy}.$$

В качестве примера определим среднее расстояние для точки, лежащей внутри прямоугольной фигуры (рис. 2, а).

$$R_{cp} = \frac{1}{(b-a)(d-c)} \int_c^d dy \int_a^b \sqrt{x^2 + y^2} dx.$$

Определив двойной интеграл, получим:

$$l_{cp} = \frac{bd}{3} \sqrt{d^2 + b^2} - \frac{bc}{3} \sqrt{c^2 + b^2} - a^2 + c^2. \quad (1)$$

Как видим, для самой простой фигуры выражение получается сложным и, поэтому, для практического применения неудобным. Для других фигур они еще сложнее. Более простые зависимости получаются при приближенном определении расстояний по формуле среднеквадратичного  $l_{KB}$ :

$$l_{KB} = \sqrt{\frac{\iint_F ((x)^2 + y^2) dx dy}{\iint_F dx dy}},$$

где интеграл в числителе представляет полярный момент инерции.

Заметим, что

$$l_C \leq l_{cp} \leq l_{KB},$$

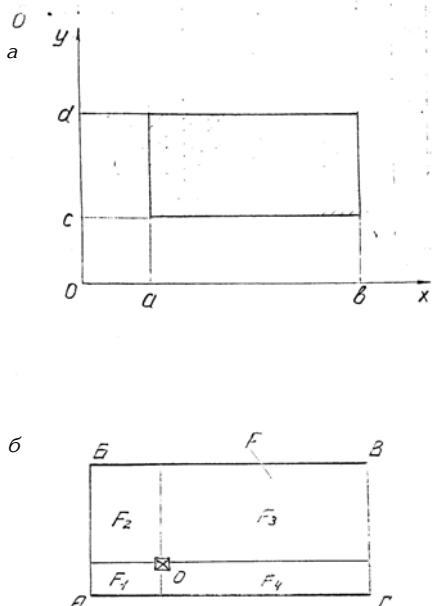
где  $l_C$  — расстояние до центра тяжести фигуры.

Например, для прямоугольника:

$$l_{KB} = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + ab + cd}{3}};$$

$$l_C = \sqrt{x_C^2 + y_C^2},$$

где  $x_C^2 + y_C^2$  — координаты центра тяжести.



**Рис. 2. Схемы к определению среднего расстояния:** а — для точки внутри прямоугольника; б — путем разделения фигуры (АБВГ) на части

Подобным образом были получены зависимости для ряда геометрических фигур (рис. 3). Они оказались также весьма сложными. Были проведены сравнительные многовариантные расчеты по точным и приближенным зависимостям, в которых за среднее принималось расстояние до центра тяжести геометрической фигуры или ее частей. Установлено, что с допустимой погрешностью (до 3—5 %) среднее расстояние может устанавливаться по приближенным зависимостям при расположении пунктов своза в точках, представленных на рис. 3.

Для фигур произвольной формы среднее расстояние может определяться в зависимости от расположения собираемых точек разными способами. Если расстояние до собираемой точки более чем в 2—3 раза превышает наибольший размер фигуры, за среднее может приниматься расстояние до ее центра тяжести. При меньшем удалении достаточно близкие результаты получаются следующим образом. Фигура разделяется на две части прямой, проходящей через ее центр тяжести и пункт своза. Измеряется среднее расстояние до центров тяжести обеих частей. Среднее расстояние для всей фигуры устанавливается как средневзвешенное для ее частей.

Более точные результаты дает способ дополнения фигуры другой фигурой для получения одной из расчетных схем, представленных на рис. 3. По приведенным там зависимостям определяется среднее расстояние для всей фигуры  $I_s$  и для дополняющей фигуры  $I_d$ , затем рассчитывается для требуемой фигуры  $I$  из зависимости:

В частном случае выражение (1) упрощается. При расположении начала координат в углу прямоугольника ( $a=c=0$ )

$$I_{CP} = \cup(1/6)(2\sqrt{(2b^2 + d^2)^2}) + \\ + \cup(b^2/d)\ln\left(\left(d + \sqrt{(b^2 + d^2)^2}\right)/b\right).$$

Это выражение можно использовать при разном расположении точки сбора относительно фигуры. Если эта точка лежит внутри фигуры, она рассекается двумя взаимно перпендикулярными прямыми на 4 части (рис. 2, б). Для каждой из них определяется  $I_{CP}$ . Среднее расстояние перемещения для всей фигуры определяется как средневзвешенное

$$I_{CP} = \frac{1}{F}(I_1F_1 + I_2F_2 + I_3F_3 + I_4F_4).$$

Если форма фигуры несколько отличается от прямоугольной, то она может быть заменена равновеликим правильным прямоугольником. Изменение среднего расстояния при этом, как правило, не выходит за пределы точности расчетов.

$$I = I_o F_o - I_d F_d / F,$$

где  $F$  — площадь рассматриваемой фигуры.

Если точка помещается внутри контура, фигура разбивается на части прямыми, проходящими через нее, таким образом, чтобы получить фигуры, для которых известны зависимости для определения расстояния, обычно треугольники, прямоугольники и секторы. Фигуры неправильной формы заменяются равновеликими правильными фигурами. Среднее расстояние для всей фигуры определяется как средневзвешенное ее частей.

Среднее расстояние изменяется для равновеликих фигур в зависимости от их очертания. Наименьшее расстояние обеспечивается при перемещении горной массы в центр блока круглой формы, несколько большее — в центр равновеликого квадрата. С увеличением длины фигуры среднее расстояние увеличивается, примерно, в линейной зависимости.

Изложенные положения верны и при обратном направлении перемещения пород, то есть от пункта примыкания въезда на отвал к плоскости отвального яруса по поверхности этого яруса.

Для открытых разработок характерно расположение точек на контуре фигуры, представляющей рабочий горизонт, или отвальный ярус. При этом наименьшее среднее расстояние для равновеликих фигур имеет место, при прямолинейном транспортировании пород, в центр половины круга, а для прямоугольника — в точку, лежащую в середине его длинной стороны при соотношении длины к высоте 2:1. При другом расположении собираательных точек среднее расстояние для горизонтов прямоугольной формы и равных объемах изменяется следующим образом:

Расположение точки сбора					
	в середине длинной стороны		в середине короткой стороны		
Отношение сторон	25:1 4:1 2:1 1:1		25:1 4:1 2:1 1:1		
Относительное расстояние	2,5 1,1 1,0 1,1		5,0 2,0 1,5 1,1		

Как видим, транспортная работа на рабочих горизонтах зависит от их очертаний, последовательности отработки и расположения пунктов примыкания трасс.

Установив зависимости и закономерности определения расстояний перемещения горной массы, можно определить положение ОПС в первый этап вскрытия горизонта, когда горная масса перемещается прямолинейно в собираательную точку (пункт своза). ОПС должен находиться (исходя из определения) в той точке, где работа по перемещению грузов в эту точку минимальна.

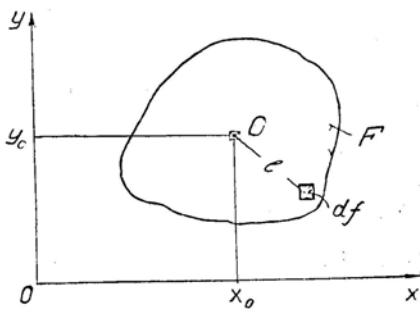
Рассмотрим произвольную фигуру площадью  $F$  с равномерно распределенным грузом, который свозится по кратчайшим расстояниям в ОПС — точку  $O$  с координатами  $x_0, y_0$  (рис. 4).

«Работа» перемещения груза  $dA$  с элементарной площадки  $df = dx dy$  равна:

$$dA = I df,$$

а вся работа

$$A = \iint_F I df.$$



**Рис. 3. Схема к определению положения ОПС**

В принятой системе координат

$$l = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}.$$

Для нахождения минимума функции двух переменных  $A(x_0, y_0)$ , берем частные производные по  $x_0$  и  $y_0$  и приравниваем их нулю.

$$\frac{dA}{dx_0} = 0 \quad ; \quad \frac{dA}{dy_0} = 0 ;$$

$$\frac{dA}{dx_0} = \frac{d}{dx_0} \iint_F l df ;$$

$$\frac{dl}{dx_0} = \frac{\lambda \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}}{dx_0} = -\frac{x - x_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} ;$$

$$\iint_F \frac{x - x_0}{l} df = 0 ; \quad \iint_F \frac{x}{l} df = x_0 \iint_F \frac{df}{l} ,$$

Отсюда получаем общие выражения для нахождения координат ОПС  $x_0$  и  $y_0$ :

$$x_0 = \frac{\iint_F \frac{x}{l} df}{\iint_F \frac{df}{l}} ;$$

аналогично определяется:

$$y_0 = \frac{\iint_F \frac{y}{l} df}{\iint_F \frac{df}{l}} .$$

Несмотря на полученные общие выражения, не удается установить аналитические выражения даже для простейших фигур, так как не берется двойной интеграл для этих функций. Представляется, что это может быть предметом решения самостоятельной математической задачи, что выходит за рамки настоящей работы.

Для практического определения ОПС исследованы его некоторые свойства. Из выражения 1 на рис. 2 установлено, что геометрическое место расположения ОПС для отрезка прямой есть прямая, проходящая перпендикулярно отрезку через его середину. С использованием этого свойства доказано, что для фигур, симметричных относительно оси, ОПС расположен на этой оси, а для симметричных относительно центра — в центре.

Численными методами было исследовано большое количество асимметричных фигур с различными относительными размерами. Установлено, что среднее расстояние до центра тяжести фигуры незначительно отличается (не более, чем на 3-5 %) от расстояния до ОПС. Поэтому можно с достаточной определенностью утверждать, что с практически требуемой точностью при перемещении горной

массы на горизонте по кратчайшей траектории за ОГС может приниматься центр тяжести фигуры, образуемой контуром отработанной части горизонта.

Изложенные положения по установлению наилучшего положения пункта примыкания вскрывающей выработки к рабочему горизонту являются исходными для оптимизации расположения всей трассы по критерию минимизации энергозатрат.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевяков Л.Д. Основы теории проектирования угольных шахт. — М., Углехиздат, 1958.
2. Белозеров В.И., Истомин В.В. Вскрытие рабочих горизонтов на карьерах цветной металлургии. — М.: Цветметинформация, 1977.
3. Фихтенгольц Г.М. Вопросы математического анализа, т.2. М., Наука, 1968.
4. Бронштейн И.М., Семендяев К.А. Справочник по математике. — М.: ГИТТВ, 1957. **ГИАБ**

---

#### КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Белозеров Виктор Иванович — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института горного дела им. А.А. Скочинского, e-mail: [blzrv70@mail.ru](mailto:blzrv70@mail.ru).



---

#### РУКОПИСИ, ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «ГОРНАЯ КНИГА»

##### ИСКРОЗАЩИТА И ВЗРЫВОЗАЩИТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАРЬЕРОВ ИСКРОЗАЩИТЫ, СТРУКТУРНАЯ ЗАЩИТА

(№896/06-12 от 16.03.12, 6 с.)

Волошиновский К.И. — кандидат технических наук, соискатель ученой степени, ассистент кафедры «Автоматики и телемеханика», e-mail: volkir@nm.ru.

Приводится краткая характеристика широко применяемой в настоящее время структурной искрозашиты, в частности шунт-диодной искрозашиты. В ряде случаев приходится рассматривать и подвергать анализу именно структурную защиту, тем более что она может применяться в эксплуатируемых повсеместно шкафах телеметрии Аксон-XL, рекомендованных к применению ОАО «Мособлгаз», в которых уже предусмотрена DIN рейка для её установки. Рассмотрены некоторые сложности анализа структурной искрозашиты, связанные с разработкой встроенных схем других видов искрозашиты, приводятся достоинства и недостатки структурной искрозашиты и шунт-диодной искрозашиты, а также сложности, с которыми приходится бороться в случае разработки схемотехнических решений искрозашиты на основе структурных схем.

*Ключевые слова:* шунт-диодная искрозашита, телеметрия, анализ структурной искрозашиты.

##### HARDWARE CIRCUIT DECISIONS FOR IMPLEMENTING SPARK AND EXPLOSION SAFETY, WITH APPLYING DIODE-RESISTANCE STRUCTURE CIRCUITS AND BLOCKS

Voloshenovskiy K.I.

In the article adduced short characteristics of broadly applied diode-resistance structure safety schemes, in particular shunt-diode sparksafety. In amount it is needed to examine and analyse especially shunt-diode sparksafety, moreover it can be used in telemetry boxes Axon-XL, recommended by Mosoblgaz, with DIN holder-rack for block mounting. In the article are distinguished several complications of structure sparksafety schemes, related to inner embedded schemes developing of other kinds of sparksafety schemes. In the article are listed drawbacks of sparksafety structure schemes and shunt-diode sparksafety schemes, with the list of complication features are met structure sparksafety schemes.

*Key words:* the shunt-diode implementing spark, telemetry, the analysis structural implementing spark.