

УДК 620.9.008

С.Н. Березовский, канд. техн. наук, зав. кафедрой «Автомобильные дороги»

Определение технически достижимой производительности и обоснование оптимальной производительности карьеров

В статье разработан метод определения производительности экскаваторов с заданной надежностью и учетом случайных изменений высоты уступа. Усовершенствована модель определения технически достижимой производительности карьеров в сложных условиях залегания гравийно-песчаных месторождений. Выполнено имитационное моделирование технически достижимой производительности карьера по горным возможностям. Установление достижимой производительности карьера является важнейшей задачей проектирования, так как позволяет определить возможности покрытия предприятием потребности в сырье при возрастании спроса на его продукцию. Производственная мощность карьера находится в прямой зависимости от интенсивности развития горных работ, характеризующейся двумя показателями: скоростью подвигания фронта горных работ и скоростью углубления карьера.

Одним из основных показателей работы горных предприятий является их производственная мощность. Производственная мощность карьера характеризует его производительность по полезному ископаемому и горной массе. Взаимосвязь между ними при проектировании выражают соотношениями [1, 2]:

$$\Pi_{\text{ГМ}} = \Pi_{\text{ПИ}} + \Pi_{\text{В}} \quad (1)$$

$$\Pi_{\text{ГМ}} = \Pi_{\text{ПИ}} (1 + k), \quad (2)$$

где $\Pi_{\text{ГМ}}$, $\Pi_{\text{ПИ}}$, $\Pi_{\text{В}}$ – производительность карьера по горной массе, полезному ископаемому и вскрыше соответственно, м³;

k – эксплуатационный (текущий) коэффициент вскрыши.

Установление достижимой производительности карьера является важнейшей задачей проектирования, так как позволяет определить возможности покрытия предприятием потребности в сырье при возрастании спроса на его продукцию. Производственная мощность карьера находится в прямой зависимости от интенсивности развития горных работ, характеризующейся двумя показателями: скоростью подвигания фронта горных работ и скоростью углубления карьера. При разработке месторождений нерудных строительных материалов, представленных преимущественно пологими и горизонтальными залежами, возможная производительность карьера зависит в основном от скорости подвигания горных работ.

Для простых условий залегания годовую производительность карьера (м³/год) определяют по формуле [1]:

$$\dot{I}_{\text{г}} = V_p m l_{\text{од}} \frac{k_{\text{г}}}{1 - \rho}, \quad (3)$$

где V_p – скорость подвигания фронта горных работ по полезному ископаемому, м/год;

m – мощность пласта полезного ископаемого, м;

$l_{\delta\delta}$ – протяженность фронта работ в карьере по полезному ископаемому на добычном уступе, м;

k_e – коэффициент извлечения полезного ископаемого;

ρ – коэффициент разубоживания полезного ископаемого.

Скорость перемещения фронта горных работ по полезному ископаемому (м³/год) можно определить из соотношения:

$$V_p = \frac{Q_y}{L_{\text{бл}} h}, \quad (4)$$

где Q_y – годовая производительность экскаватора, м³/год;

$L_{\text{аэ}}$ – длина фронта работ, приходящаяся на один экскаватор, м;

h – высота уступа, м.

В приближенных расчетах величиной потерь и разубоживания, учитывая их незначительную величину, часто пренебрегают и производительность карьера определяют в виде:

$$\Pi_{\text{и}} = \frac{l_{\text{фр}}}{L_{\text{бл}}} \frac{m}{h} Q_y. \quad (5)$$

В данной формуле $\frac{m}{h}$ представляет собой количество добычных уступов. Заменяя в формуле (5) $l_{\delta\delta} \frac{m}{h} = L_{\delta\delta}$, где $L_{\text{фр}}$ – суммарная протяженность добычного фронта в карьере, формулу (3.11) представляют также в виде более простой зависимости:

$$\Pi_{\text{и}} = \frac{L_{\text{фр}}}{L_{\text{бл}}} Q_y. \quad (6)$$

Представленные выше аналитические методы определения технически достижимой производительности карьеров применимы только для простых условий, когда длина фронта добычных работ и мощность залежи изменяются незначительно. В этом случае отклонения возможной производительности от её расчётного значения небольшие. Для определения технически достижимой производительности карьера в сложных условиях применяется метод, основанный на определении вертикальной площади сечения полезного ископаемого для различных этапов разработки месторождения, которую называют

«ординатой» [3]. Произведение ординаты на годовое продвижение фронта добычных работ определяет технически достижимую годовую производительность карьера для данного этапа разработки месторождения. Недостатком метода является то, что он не учитывает возможные отклонения длины фронта работ и количества добычных уступов (мощности залежи) на значительном участке годового продвижения горных работ. Кроме этого, принимаемая в расчётах вертикальная площадь сечения залежи полезного ископаемого отражает реальную площадь вертикальной проекции рабочей зоны только при выдержанной мощности полезного ископаемого. При значительной её вариации, вследствие опережения верхними добычными уступами нижних, так называемая «ордината» не характеризует действительной площади вертикальной проекции рабочей зоны.

Возможную производительность карьера при произвольном направлении фронта работ предлагается нами определять по периодам, соответствующим промежуточным положениям рабочей зоны. Для этого на погоризонтных планах наносятся положения фронта добычных работ для разных этапов (периодов) разработки месторождения. Продолжительность периода отработки запасов между смежными положениями рабочей зоны (годы) определяется по формулам:

$$t_i = \frac{l \cdot h \cdot L_{\text{бл}}}{Q_{\text{э}}} \quad \text{или} \quad t_i = \frac{l}{v_p}, \quad (7)$$

где l – максимальное расстояние между промежуточными положениями рабочей зоны, измеренное по горизонтали на погоризонтном плане, м;

$Q_{\text{э}}$ – годовая производительность экскаватора, м³/год;

$L_{\text{бл}}$ – длина фронта работ, приходящаяся на один экскаватор, м;

h – высота уступа, м;

v_p – годовое продвижение фронта горных работ, м.

Технически достижимая производительность по полезному ископаемому, усредненная по годам в каждом периоде (м³/год), определяется при этом по формуле:

$$\Pi_i = \frac{P_i}{t_i}, \quad (8)$$

где P_i – запасы полезного ископаемого между смежными положениями рабочей зоны, м³.

Очевидно, что точность определения возможной производительности зависит от длины интервалов, через которые отстраиваются этапы разработки карьера, и учёта вероятных изменений высоты уступа и производительности экскаватора. Учёт случайных изменений высоты уступа и производительности экскаватора возможен на основе использования теоретических распределений их вероятностей и имитационного моделирования.

Характер распределения случайных величин устанавливается по результатам статистических испытаний.

Случайные значения высоты уступа, распределённые по закону Вейбулла, можно вычислить по формуле

$$h = -\sigma \ln(1 - \xi_1)^{1/\eta}, \quad (9)$$

где ξ_1 – случайное число, взятое из таблицы случайных чисел.

Случайная величина годовой производительности экскаватора моделируется с использованием зависимостей для определения технической производительности экскаватора.

Случайная величина запасов полезного ископаемого (p_i) между смежными положениями рабочей зоны моделируется с использованием зависимости [1, 4].

$$P_i = M(p) + \xi_2 \sigma_p, \quad (10)$$

где $M(p)$, σ_p – математическое ожидание и среднее квадратичное отклонение запасов полезных ископаемых соответственно;

ξ_2 – случайные числа, распределённые по нормальному закону.

В таблице 1 приведены результаты моделирования высоты уступа, годовой производительности экскаватора ЭО-5111Б (для грунтов 2, 3 группы по классификации СНБ), времени отработки запасов между смежными положениями рабочей зоны (при перемещении фронта горных работ на 100 м, длине экскаваторного блока – 100 м) и технической достижимой годовой производительности карьера. Всего в процессе моделирования проведено 50 испытаний.

Таблица 1. Результаты моделирования технической достижимой производительности карьера

№ опыта	ξ_1	\bar{h}	k_h	Q_3	ξ_2	P_i	h	t_i	Π_i
1	0,10	0,49	0,85	105646	-1,276	121290	4,38	0,41	292799
2	0,38	0,76	0,97	121115	-0,318	142845	6,84	0,56	253048
3	0,84	1,14	0,97	121291	-1,377	119018	10,2	0,84	142042
4	0,99	1,49	0,81	100275	2,334	202515	13,3	1,33	152255
5	0,13	0,53	0,87	108517	-1,136	124440	4,75	0,44	284189
...
50	0,69	0,99	1,00	124534	0,498	161205	8,29	0,72	225426
Среднее						153186	8,29		232410

Данные моделирования позволяют выполнить прогноз технической достижимой производительности карьера с заданной надёжностью, характеризуемой вероятностью события. В частности, исходя из данных моделирования с вероятностью 0,84, технически достижимая производительность карьера не опустится ниже 177951 м³/год при среднем значении 232410 м³/год и среднее квадратичном отклонении 54459 м³/год.

Одним из основных показателей работы любого предприятия является его производственная мощность. Производственная мощность карьера характеризуется объёмами добычи полезного ископаемого в течение определённого календарного периода. Правильное определение производственной мощности предприятия является важнейшей задачей проектирования.

Производительность карьера по полезному ископаемому влияет на экономические показатели работы предприятия. Поэтому при её определении, кроме горнотехнических факторов, необходимо учитывать экономические последствия выбранной производительности. Одним из важнейших экономических факторов, влияющих на величину производительности карьеров, является спрос на товарную продукцию, производимую горно-перерабатывающим предприятием. Товарная продукция поступает на склад, откуда она поставляется потребителям. Запасы готовой продукции определяются планом производства и служат для удовлетворения спроса на продукцию со стороны клиентов предприятия. В свою очередь, объёмы производства товарной продукции определяют потребность предприятия в сырье, т.е. производительность карьера. Чрезмерно большие запасы основной продукции повышают её себестоимость, так как с их ростом увеличиваются затраты на хранение. С другой стороны, предприятие при нехватке продукции несёт убытки, проистекающие из-за неудовлетворённого спроса [5].

Возникает задача определения оптимальных запасов товарной продукции и, как следствие, производственной мощности карьера по полезному ископаемому. Данная задача относится к стохастическим моделям управления запасами, так как в существующих экономических условиях работы горно-перерабатывающих предприятий спрос на их продукцию является случайным.

Допустим, что нам известен спрос r на продукцию и его вероятность $p(r)$, а также заданы издержки хранения c_s и нехватки c_p данного вида товара. Спрос меняется скачкообразно, но практически всегда ступенчатый график его изменения можно заменить прямой линией (рисунок 1).

Представим, что за промежуток времени T спрос r на сырье горно-добывающего предприятия подчиняется линейному закону.

В соответствии со стохастической моделью управления запасами можно записать [6]:

– средний запас товарной продукции, соответствующий рисунку 1а, будет равен

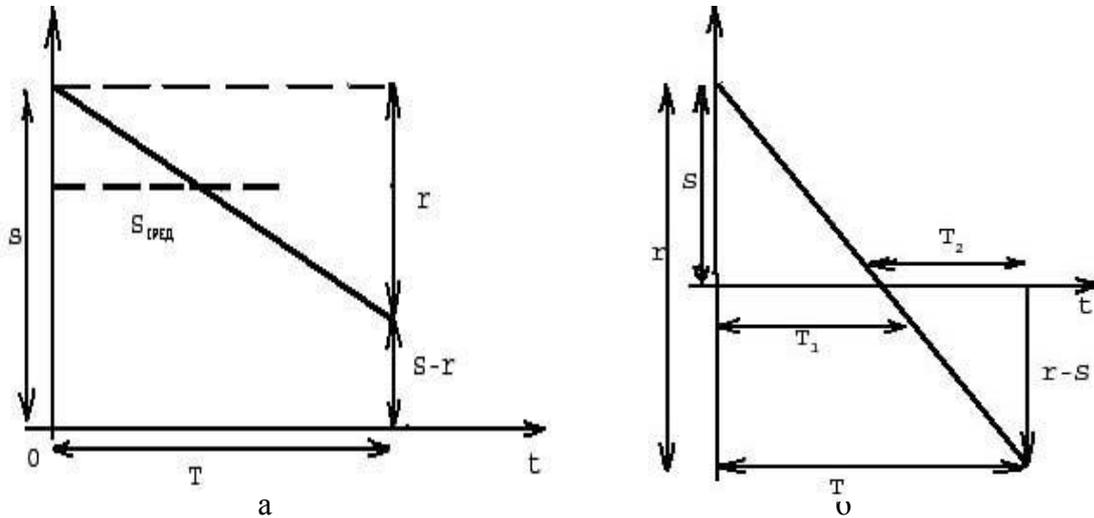
$$\bar{S}_a = \frac{1}{2}[S + (S - r)] = S - \frac{1}{2}r; \quad (11)$$

– средний запас для случая рисунка 3.2б

$$\bar{S}_b = \frac{1}{2}S \frac{T_1}{T} = \frac{1}{2} \frac{S^2}{r}; \quad (12)$$

– средняя нехватка для случая рисунка 1б

$$\bar{P}_b = \frac{1}{2}(r - S) \frac{T_2}{T} = \frac{1}{2} \frac{(r - S)^2}{r}. \quad (13)$$



а – запаса достаточно для удовлетворения спроса;
 б – запаса недостаточно для удовлетворения спроса

Рисунок 1. График изменения спроса на товарную продукцию во времени

Если спрос r имеет распределение $p(r)$ до тех пор, пока $r \leq S$, издержки хранения будут равны

$$C_s \left(S - \frac{1}{2} r \right) p(r). \quad (14)$$

Если спрос $r > S$, издержки хранения будут составлять

$$C_s \frac{1}{2} \frac{S^2}{r} p(r), \quad (15)$$

к чему добавятся издержки от нехватки

$$C_p \frac{(r-S)^2}{2r} p(r), \quad (16)$$

для каждого значения r .

Запишем сумму всех издержек в виде

$$\tilde{A}(S) = C_S \sum_{r=0}^S (S - \frac{r}{2}) p(r) + C_S \sum_{r=S+1}^{\infty} \frac{1}{2} \frac{S^2}{r} p(r) + C_P \sum_{r=S+1}^{\infty} \frac{1}{2} \frac{(r-S)^2}{r} p(r). \quad (17)$$

После произведённого расчета строится график зависимости $\Gamma(S)$, в котором минимум функции и соответствующий ей объём производства будет оптимальным объёмом производства товарной продукции.

Производительность карьера по сырью, исходя из оптимальных планируемых объёмов производства товарной продукции, определяется из соотношений

$$A_c = \frac{\Pi_T}{\gamma} \quad \text{или} \quad A_c = \dot{I}_\partial \cdot r, \quad (18)$$

где Π_T – план производства товарной продукции;

γ – выход товарной продукции;

r – расход сырья для производства единицы товарной продукции.

Решение задачи рассмотрим на конкретном примере. Для удобства в расчетах использовалась программа Microsoft Excel.

Пример. Горное предприятие, ежегодно поставляющее своим заказчикам товарную продукцию (известь), имеет спрос на неё, подчиняющийся распределению вероятностей $p(r)$. Издержки на хранение в течение месяца установлены в размере 200 тыс.р., издержки от нехватки оцениваются около 1 млн.р. Требуется определить оптимальную производительность предприятия по полезному ископаемому. В качестве полезного ископаемого используется мел. Для производства 1 т извести требуется 2,3 т мела. Результаты расчета месячных суммарных издержек при разном объёме производства приведены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчета месячных суммарных издержек при разном объёме производства

Запасы товарной продукции S , тонн	Спрос на продукцию r , тонн	Вероятность спроса $p(r)$	Общие издержки $\Gamma(S)$, р.
0	0	0.01	0
5000	5000	0.05	8077666
10000	10000	0.08	5365666
15000	15000	0.12	3819000
20000	20000	0.16	3172666
25000	25000	0.16	3261666
30000	30000	0.18	3795000
35000	35000	0.14	4611666
40000	40000	0.08	5561666
45000	45000	0.02	6555000

Из таблицы 2 видно, что для данных условий минимум издержек находится в области запасов продукции, соответствующей 20 тыс. тонн извести в месяц. Результаты расчётов наглядно иллюстрируются графически (рисунок 2).

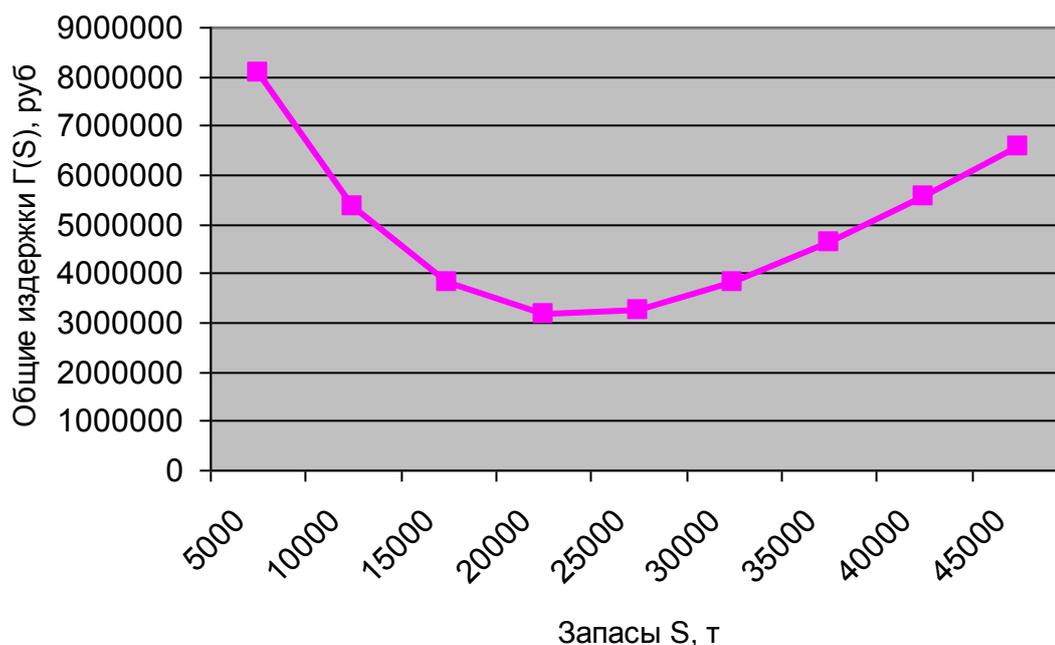


Рисунок 2. График зависимости суммарных издержек предприятия от запаса производственной продукции

Если провести касательную к минимальному значению $\Gamma(S)$, то абсцисса точки касания определит оптимальную программу предприятия по производству товарной продукции.

Оптимальную месячную производительность карьера по полезному ископаемому определим с учетом расхода сырья на производство единицы продукции:

$$A_{\text{с.мес.}} = \Pi_{\text{т.мес.}} \cdot r = 20000 \cdot 2,3 = 46000 \text{ т} . \quad (19)$$

Для перехода к единицам объёма $A_{\text{с.дан.}} = 46000 / 1,96 = 23469 \text{ м}^3$, где 1,96 – объёмная масса мела, годовая производительность карьера, обеспечивающая минимум суммарных издержек, составит

$$A_{\text{с.год.}} = 23469 \cdot 12 = 281632 \text{ м}^3 .$$

Рассмотренный метод позволяет надёжно рассчитать оптимальную производительность карьера по любому виду полезного ископаемого за заданный календарный период в условиях случайного спроса на товарную продукцию, характерного для рыночной экономики.

Выводы

1. Разработана методика определения производительности экскаваторов с заданной надежностью и учетом случайных изменений высоты уступа.
2. Усовершенствована модель определения технически достижимой производительности карьеров в сложных условиях залегания гравийно-песчаных месторождений.
3. Выполнено имитационное моделирование технически достижимой производительности карьера по горным возможностям.
4. Предложен метод определения оптимальной производительности карьера с учетом спроса на продукцию, производимую и реализуемую горным предприятием.

Список литературы

1. Арсентьев, А.И. Определение производительности и границ карьеров / А.И. Арсентьев. – М.: Недра, 1970. – 232 с.
2. Арсентьев, А.И. Производительность карьеров / А.И. Арсентьев. – С.-Петербург: С-ПИИ, 2002. – 85 с.
3. Ржевский, В.В. Технология и комплексная механизация открытых горных работ / В.В. Ржевский. – М.: Недра, 1975. – 541 с.
4. Богатов, Б.А. Математические методы и модели в горном деле / Б.А. Богатов. – Минск: УП «Технопринт», 2003 г. – 115 с.
5. Оника, С.Г. Совершенствование методов определения достижимой производительности карьеров при разработке строительных горных пород в сложных условиях / С.Г. Оника // Состояние пути развития техники, технологии и подготовки инженеров горной промышленности РБ: сб. научных трудов БНТУ. – Минск: БНТУ, 2006. – С.12-15.
6. Кофман, А. Методы и модели исследования операций / А. Кофман. – М.: Мир. – 1966. – 325 с.

Белорусско-Российский университет
Материал поступил 05.10.2011

S.N. Berezovsky, Cand.Tech.Sci., the head of chair "Highway" Definition of technically achievable productivity and substantiation of optimum productivity of open-cast mines

In article the method of definition of productivity of dredges with set reliability and the account of casual changes of height of a ledge is developed. The model of definition of technically achievable productivity of open-cast mines in difficult conditions burial sandy-gravel deposits is improved. Simulation modeling of technically achievable productivity of an open-cast mine by mountain possibilities is executed. The establishment of achievable productivity of an open-cast mine is the major problem of designing as allows to define possibilities of a covering the enterprise of requirement for raw materials at increase of demand for its production. Capacity of an open-cast mine is in direct dependence on intensity of development of the mountain works, characterised by two indicators: in the rate of face advance and penetration feed of an open-cast mine.