

Таким образом, рассмотренный инерционный процесс решение контактных задач с трением позволяет получать дополнительную информацию к вопросу о единственности решения.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Вовкушевский А.В., Шийхет Б.А. Расчет массивный гидротехнических сооружений с учётом раскрытия швов. – М. : Энергоиздат, 1981. – 383 с.
2. Дюво Г., Лионс Ж.-Л. Неравенства в механике и физике: Пер. с франц. – М. : Наука, 1980. – 383 с.
3. Вовкушевский А.В., Дурнев В.А. Об устойчивости решения задачи теории упругости с условиями трения на границе // Изв. Всесоюз. научно-исслед. ин-та гидротехники, 1984. – т. 171. – с. 86-91.
4. Вовкушевский А.В., Дурнев В.А. Численная реализация некоторых способов решения задачи Синворини с трением // Тр. ЛПИ. – 1985. – №405. – с. 14-19.

*И.В. ЛУНКИН, Е.А. АЛЕКСЕЕВА, К.Л. ЛАППО*

**АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТИПОРАЗМЕРА  
ТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ В КАРЬЕРЕ**

Разработана аналитическая модель выбора транспортного оборудования в карьере, которая обеспечивает для конкретных условий минимальные удельные затраты на погрузочно-транспортные работы. Установлено, что оптимальное соотношение грузоподъемности транспортной единицы к грузоподъемности ковша экскаватора составляет 3-7 в зависимости от расстояния транспортировки.

Материально-техническое обеспечение дорожного строительства включает в себя разработку карьеров дорожно-строительных материалов (скальных пород, песка, гравия, глины и т.д.). Карьеры подразделяют на промышленные и строительные. Промышленные карьеры – постоянно действующие, капитально оборудованные предприятия. Они снабжают дорожные стройки в радиусе 1000-1500 км [1].

Строительные карьеры – предприятия временного типа со сроком эксплуатации 1-3 года. Строительные карьеры бывают притрассовые и базисные. В практике дорожного строительства используются все виды карьеров. Технологический процесс разработки месторождения состоит из следующих работ: подготовительных, вскрышных, добычных, транспортных и погрузочно-разгрузочных.

Задача выбора транспорта обычно решается при помощи эмпирических зависимостей с использованием имитационного моделирования, метода итераций, много регрессионного и вероятностного анализа. В тоже время более эффективным представляется использование аналитической модели, полученной исходя из условия соответствия сменных производительностей погрузочной и транспортной частей комплекса.

Совместная работа погрузочного и транспортного оборудования характеризуется большим числом взаимозависимых факторов. Наиболее эффективная работа выемочно-погрузочного и транспортного оборудования достигается при минимальной себестоимости погрузки и транспортировании 1т горной массы.

$$C = C_{эк} + C_{тр} \rightarrow \min , \tag{1}$$

$$C_{эк} = \frac{C_{м.э}}{P_э} ; \quad C_{тр} = \frac{C_{м.т}}{P_т} ;$$

$$C = \frac{C_{м.э}}{P_э} + \frac{C_{м.т}}{P_т} \rightarrow \min , \tag{2}$$

где  $C_{м.э}$ ,  $C_{м.т}$  – стоимость машино-смены соответственно погрузочной и транспортной единицы, руб.;

$P_э$ ,  $P_т$  – производительность соответственно погрузочной и транспортной единицы в смену, т.

Производительность машин используемых при строительстве и реконструкции автодороги определяется по соответствующим нормативным документам [1]. В случае отсутствия норм, производительность машин рассчитывается по формулам [2].

Согласно [2] в комплексах оборудования циклического действия разветвленной структуры часовую производительность экскаватора,  $a$ , следовательно, и производительность всего комплекса оборудования (т/ч) можно выразить в виде:

$$P_{э.ч} = \frac{60k_c q_e k_q}{T_{ц} \xi + t_0} \xi, \quad (3)$$

$a$  эксплуатационная производительность (т/ч) транспортной единицы:

$$P_{т.ч} = \frac{60k_c q_t k_q}{T_{ц} \xi + t_0 + t_p}, \quad (4)$$

где  $T_{ц}$  – средняя продолжительность цикла экскавации в конкретных условиях, мин;

$t_0$  – время обмена автосамосвала, мин;

$t_p$  – время рейса автосамосвала за исключением погрузочно-обменных операций, мин.;

$k_q$  – коэффициент использования грузоподъемности (0,95-1,1);

$k_c$  – коэффициент снижения производительности из-за неравномерности погрузочно-транспортных операций ( $k_c \leq 1$ );

$q_e$  – масса породы в ковше экскаватора, т;

$\xi = q_t/q_e$  – отношение грузоподъемности транспортной единицы к грузоподъемности экскаватора;

$q_t$  – грузоподъемность автосамосвала, т.

Количество машин необходимое для эффективной работы комплекса определяется из отношения:

$$N = t_p^n / (T_{ц} \xi + t_0), \quad (5)$$

где  $t_p^n$  – полное время рейса, включая погрузочно-обменные операции.

Число машин по данным [2] необходимо округлять в меньшую сторону. При данном количестве машин достигается наибольшая производительность комплекса ( $k_c \cong 1$ ). Например  $t_p^n = 18$  мин.;  $T_{ц} \xi + t_0 = 1.5$  мин. Число машин для нормального функционирования комплекса  $N = 18/1.5 = 12$ . Задача заключается в определении оптимальной грузоподъемности машин для конкретного типоразмера экскаватора, который определяется исходя из основных параметров карьера (высоты уступа).

Определение оптимального отношения грузоподъемности транспортной единицы к грузоподъемности экскаватора целесообразно производить, используя сменную производительность погрузочно-транспортного комплекса.

После подстановки в (3, 4)  $q_t = q_e \xi$  и  $t_{см}$ , сменная производительность погрузочных и транспортных  $P_э, P_т$  средств определится из выражений:

$$P_э = \frac{60k_c q_e k_q t_{см}}{T_{ц} \xi + t_0} \xi; \quad P_т = \frac{60k_c q_e k_q t_{см}}{T_{ц} \xi + t_0 + t_p} \xi \quad (6)$$

Количество ковшей вмещающихся в кузов автосамосвала:  $n = \xi k_э$ , где  $k_э$  – коэффициент экскавации (0,5-0,8). Коэффициент экскавации зависит от степени дробления горной массы, физико-технических свойств пород и емкости ковша экскаватора. После подстановки (6) в (2) получим выражение для определения удельных затрат на погрузочно-транспортные работы в зависимости от отношения грузоподъемностей транспортной единицы и емкости ковша экскаватора:

$$\frac{(C_{м.э} + C_{м.т})T_{ц} \xi + (C_{м.э} + C_{м.т})t_0 + C_{м.т} T_p}{60k_c q_e k_q t_{см} \xi} \rightarrow \min \quad (7)$$

Стоимость машино-смены транспортной единицы  $C_{м.т}$  зависит от грузоподъемности транспортной единицы и горнотехнических условий, т.е. для данного карьера  $C_{м.т} = f(\xi)$ . По данным Б.А. Симкина сравнительная стоимость транспортирования составляет:

Грузоподъемность автомобиля, т	5	10	25	40	110
Стоимость, %	100	90	60	50	20

По статистическим данным стоимость машино-смены автосамосвала в зависимости от грузоподъемности аппроксимируется степенной функцией:

$$C_{м.т} = a q_T^b, \\ C_{м.т} = a (\xi q_e)^b \quad (8)$$

Значения коэффициента  $a$  и показателя степени  $b$  зависят от горнотехнических условий и вида транспорта и должны определяться для конкретного карьера. Их значения для различных видов горно-транспортного оборудования, полученные по данным расчетов по специальной программе [3] представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения коэффициента  $a$  и показателя степени  $b$  для различных видов горного оборудования.

Оборудование	Коэффициент $a$	Показатель степени $b$	Коэффициент корреляции
Автосамосвалы	2,93	0,95	0,97
Экскаваторы	69,75	0,91	0,97
Буровые станки	6,0	0,9	0,98
Скреперы	2,34	1,27	0,99
Колесные погрузчики	14,31	1,02	0,98

После подстановки (8) в (7) зависимость удельных затрат на погрузочно-транспортные работы примет вид:

$$\frac{[C_{м.э} + a (q_e \xi)^b] T_{ц} \xi + [C_{м.э} + a (q_e \xi)^b] t_0 + a (q_e \xi)^b T_p}{60 k_c q_e k_q t_{см} \xi} \rightarrow \min \quad (9)$$

Входящие в выражение (9) величины  $T_{ц}$ ,  $C_{м.э}$ ,  $k_c$  не зависят или слабо зависят от отношения грузоподъемности транспортной единицы к грузоподъемности экскаватора, но зависят от типоразмера экскаватора. Продолжительность цикла экскавации  $T_{ц}$  по данным [4]:

$$T_{ц} = 21,64 + 0,545 E, \text{ с.} \quad (10)$$

Стоимость машино-смены экскаватора в зависимости от емкости ковша имеет степенную зависимость:

$$C_{мэ} = c q_e^d \quad (11)$$

Значения коэффициента  $c$  и показателя степени  $d$  зависят от горнотехнических условий и вида транспорта и должны определяться для конкретного месторождения.

Результаты компьютерного моделирования по предлагаемой методике представлены на рис.1. Определялась оптимальная грузоподъемность автосамосвала при транспортировке горной массы на разные расстояния и при погрузке различными экскаваторами.

Кривые на рис. 1 а в последовательности снизу вверх соответствуют ковшам с  $E = 15 \text{ м}^3$ ;  $E = 12 \text{ м}^3$ ;  $E = 8 \text{ м}^3$ , а на рис. 1 б в последовательности снизу вверх дальности транспортировки: 1 км; 2 км; 3 км при вместимости ковша экскаватора  $8 \text{ м}^3$ . Плотность породы  $3 \text{ т/м}^3$ . Коэффициенты степенной функции для условий данного карьера  $a = 7$ ,  $b = 0,9$ .

Коэффициенты степенной функции, которой аппроксимируется стоимость машино-смены автосамосвалов, определялись по результатам статистической обработки технико-экономических показателей работы автотранспорта. Продолжительность смены  $t_{см} = 480 \text{ мин}$ .

Как видно из рис.1, оптимальное соотношение между грузоподъемностью транспортной единицы и массой породы в ковше экскаватора для комплекса автосамосвал – экскаватор изменяется в пределах 3-7 в зависимости от расстояния транспортировки.

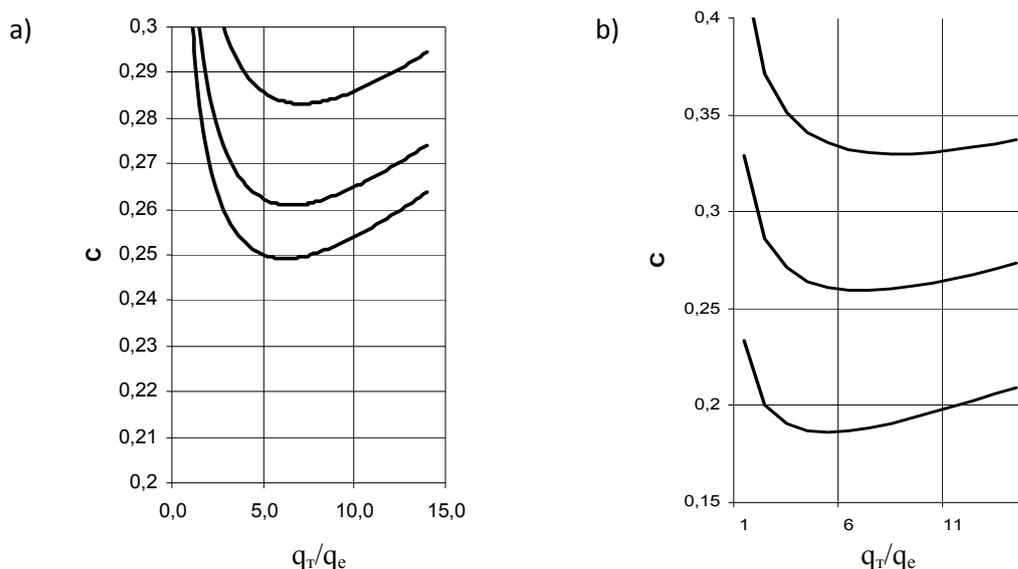


Рис. 1 Зависимость удельных затрат на погрузку и транспортирование от  $q_T/q_e$  автосамосвалами при дальности транспортирования 2 км (а); зависимость удельных затрат (в у.е.) на погрузку и транспорт автосамосвалами  $q_T/q_e$  при разной дальности транспортирования (б).

Результаты компьютерного моделирования по предлагаемой методике представлены в таблице 2. При этом определялась оптимальная грузоподъемность автосамосвала при транспортировке горной массы на разные расстояния и при погрузке различными экскаваторами.

Таблица 2

Оптимальное соотношение грузоподъемности автосамосвала и вместимости ковша экскаватора

Дальность транспортировки, км.	Вместимость ковша экскаватора, м <sup>3</sup>				
	5,0	8,0	12	15	20
1	3,7	3,4	3,1	2,9	2,6
2	4,6	4,3	3,9	3,7	3,4
3	5,7	5,4	5,0	4,7	4,3
4	6,9	6,5	6,0	5,7	5,2

Как видно из таблицы 2, оптимальное соотношение между грузоподъемностью транспортной единицы и массой породы в ковше экскаватора изменяется в пределах 3-7 в зависимости от расстояния транспортирования.

Исследуем функционал (8) на экстремум. Для этого возьмем первую производную от функции и приравняем ее к нулю. Полученное выражение имеет вид:

$$a b T_{ц} q^b e^{\xi^{b+1}} + a b q^b e^{\xi^b} (t_0 + t_p) - a q^b e^{\xi^b} (t_0 + t_p) - C_{м3} t_0 = 0 \quad (12)$$

После переноса членов с отрицательным знаком в правую часть получим уравнение удобное для решения с помощью графоаналитического метода.

$$a b T_{ц} q^b e^{\xi^{b+1}} + a b q^b e^{\xi^b} (t_0 + t_p) = a q^b e^{\xi^b} (t_0 + t_p) + C_{м3} t_0 \quad (13)$$

Если в уравнении (12) произвести замены  $\xi^b = x$ ,  $t_0 + t_p = T$ ,  $a q^b = k$ , то его можно представить, как квадратичное

$$b T_{ц} x^2 + (b-1) T x - (C_{м3} t_0)/k = 0 \quad (14)$$

Тогда аналитическое выражение для соотношения грузоподъемности автосамосвала к грузоподъемности ковша экскаватора:

$$x = \frac{(1-b)T + \sqrt{(b-1)^2 T^2 + 4bT_{\text{ц}} C_{\text{мэ}} t_0 / k}}{2bT_{\text{ц}}},$$

$$\xi = b \sqrt{\frac{(1-b)(t_0 + t_p) + \sqrt{(b-1)^2 (t_0 + t_p)^2 + 4bT_{\text{ц}} C_{\text{мэ}} t_0 / (aq_e^b)}}{2bT_{\text{ц}}}} \quad (15)$$

Выражение (15) можно упростить, если учесть, что коэффициент  $b \approx 1$  (см. табл. 1):

$$\xi = C_{\text{мэ}} t_0 / (T_{\text{ц}} a q_e), \quad (16)$$

$$q_T = C_{\text{мэ}} t_0 / (T_{\text{ц}} a), \quad (17)$$

$$\frac{C_T}{C_{\text{мэ}}} = \frac{t_0}{T_{\text{ц}}}, \quad (18)$$

Пропорция (18) показывает, что для достижения минимальных затрат на выемочно-погрузочные и транспортные работы, отношение стоимости машино-смены автосамосвала к стоимости машино-смены экскаватора должно быть равно отношению времени обмена автосамосвалов к продолжительности цикла погрузки.

Анализ модели для определения оптимального сочетания погрузочного и транспортного оборудования показывает, что:

- оптимальное значение  $\xi$ , при котором стоимость транспортирования 1 т горной массы минимальна, необходимо определять по результатам статистической обработки технико-экономических показателей работы автотранспорта и погрузочного оборудования для конкретного карьера, что позволит достичь значительного экономического эффекта;
- отношение общего времени рейса транспортной единицы ко времени ее простоя под погрузкой и во время обменных операций при оптимальной организации работы комплекса численно равно количеству транспортных единиц в комплексе;
- на расстояниях свыше 4 км функция экстремума не имеет, что означает чем больше грузоподъемность транспорта, тем меньше затраты на транспортировку (если не учитывать стоимость строительства и поддержания автодорог);
- установлена следующая закономерность: чем больше грузоподъемность транспортной единицы и стоимость ее машино-смены, тем меньше времени она должна находиться под погрузкой и тем больше времени должно уходить на выполнение основной функции – перевозить горную массу, т.е. оптимальное значение  $\xi$  уменьшается с ростом вместимости ковша экскаватора.

Предлагаемая аналитическая модель определения грузоподъемности транспорта, разработанная на базе соответствия производительностей погрузочного и транспортного звеньев комплекса, позволяет для конкретных горнотехнических условий уменьшить затраты на выемочно-погрузочные работы и сократить простои оборудования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Справочная энциклопедия дорожника. Под ред. Федотова Г.А. – т. 5. – М.: Информавтодо, 2007. – 668 с.
2. Ржевский В.В. Открытые горные работы. – ч. 2. – М.: «Недра», 1985. – 549 с.
3. Jajra S Capital investment and operating cost estimation in open pit mining. – 14<sup>th</sup> Int. Symp. Application of Computer Methods in the Mineral Industry, State College, New York, 1977. – p. 920-931.
4. Rakishev B.R., Lunkin I.V. Simulation of lay-out and type-size of mining-transport equipment. – Computer Applications in the Minerals Industries. – Calgary, Canada. 2003. – p. 123-127.