

УДК 622.684:629.353

Журавлев Артем Геннадиевич

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией
транспортных систем карьеров и геотехники,
Институт горного дела УрО РАН,
620075 г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: juravlev@igduran.ru

Буднев Алексей Борисович

лаборант лаборатории транспортных систем
карьеров и геотехники,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: a.budnev@igduran.ru

**ВЛИЯНИЕ ТИПОРАЗМЕРА
АВТОСАМОСВАЛА НА РАЗНОС
БОРТОВ КАРЬЕРА****Аннотация:*

В статье рассмотрено влияние массогабаритных характеристик автосамосвала (ширины и грузоподъемности) на объем, дополнительный разнос, а также угол погашения борта карьера. Через логическую цепочку взаимовлияния грузоподъемности карьерного самосвала «ширина самосвала – ширина транспортной бермы – угол откоса борта – объем карьера» путем аппроксимации эмпирических данных установлены закономерности изменения объема карьера от массогабаритных параметров, применяемых для их отработки карьерных автосамосвалов. При обосновании оптимального инструмента проведения исследования были дополнительно рассмотрены аналитические методики оценки объема карьера и предложен улучшенный способ его определения.

Ключевые слова: объем карьера, параметры карьера, угол погашения борта карьера, автосамосвал, грузоподъемность, погрешность расчетов

DOI: 10.25635/2313-1586.2018.02.020

Zhuravlev Artem G.

Candidate of Technical Sciences,
Chief of Laboratory for quarry transport systems
and geotechnics,
Institute of Mining of UB RAS,
620075, Ekaterinburg,
Mamina-Sibiryaka st., 58
e-mail: juravlev@igduran.ru

Budnev Alexey B.

Laboratory Worker
of Laboratory for quarry transport systems
and geotechnics,
Institute of Mining of UB RAS
e-mail: a.budnev@igduran.ru

**INFLUENCE OF THE DUMP TRUCK TYPE
AND SIZE ON THE DIVERSITY
OF THE QUARRY SIDES***Abstract:*

The paper considers the influence of the mass-dimensional characteristics of the dump truck (width and carrying capacity) on the volume, additional spacing, as well as the angle of incleaning of the quarry side. Through the logical chain of mutual influence of the load-carrying capacity of a mining dump truck “the width of the truck - the width of the transport berm - the angle of the slope of the side - the volume of the quarry” and by approximating the empirical data, the regularities in the change of the quarry volume from the mass-size parameters of the dump trucks used for mining have been defined. In substantiating the optimal research tool, analytical techniques for estimating the quarry volume have been further considered and an improved method for determining the quarry volume has been proposed.

Key words: quarry size, quarry parameters, quarry pit side angle, dump truck, load capacity, calculating error

Введение

При проектировании карьеров важно понимать, что от выбранного автосамосвала напрямую будет зависеть объем карьера, текущий и средний коэффициенты вскрыши. Данная проблема особенно остра для глубоких карьеров, имеющих ограниченные размеры в плане. Так, при разработке нового национального стандарта «Разработка алмазородных месторождений открытым способом в криолитозоне. Требования к проектированию» Институтом «Якутнипроалмаз» [1] были выполнены специальные исследования, по результатам которых для алмазородных карьеров рекомендовано установить нормативы ширины карьерных автодорог меньше регламентированных СП 37.13330.2012 нормативов. В рамках этих же работ ИГД УрО РАН обоснованы методические рекомендации по схемам вскрытия и выбору транспорта для карьерных автодорог с повышенными до 25 – 35 % уклонами на основе многолетних исследований [2 – 4]. Все это направлено

* Исследования выполнены в рамках Государственного задания 007-00293-18-00, тема № 0405-2018-0015

на оптимизацию размещения транспортных коммуникаций на бортах карьера и сокращение объемов вскрыши.

Указанному вопросу посвящен целый ряд исследований. Так, в работах [5 – 6] рассматривается влияние грузоподъемности автосамосвалов на разнос бортов карьера. Однако эти работы не учитывают параметров современных моделей автосамосвалов, а для машин грузоподъемностью более 100 т данные главным образом прогнозные. В работе [7] предложен подход к определению границы перехода на автосамосвалы меньшей грузоподъемности по мере углубки карьера, однако не представлено решение обратной задачи. В работе [8] представлен расчет объема разноса бортов карьера при заложении внутренних полутраншей автомобильных съездов для трассы спиральной формы. Однако для практических расчетов методика довольно сложна и при этом ориентирована только на карьеры круглой формы, которые в практике встречаются нечасто.

Таким образом, установление достоверных закономерностей влияния массогабаритных параметров карьерных автосамосвалов на разнос бортов карьера позволяет принимать обоснованные проектные решения при поиске рациональных решений – более высокой производительности или меньшего разноса бортов карьера – а в теоретическом плане даст удобный инструмент для дальнейших аналитических исследований.

Теория, материалы и методы

На извлекаемый объем вскрыши, а также углы откоса бортов непосредственно влияет ширина транспортной бермы. Чем она больше, тем больше горной массы необходимо извлечь при ее проходке (рис. 1). Принимаемая при проектировании модель и грузоподъемность карьерных автосамосвалов определяет размер транспортных берм, т. к. ширина проезжей части, обочины, породного вала регламентирована СП37.13330.2012 в зависимости от категории автодороги, ширины выбранного автосамосвала, а также диаметра его колеса. Следовательно, при одинаковой конструкции поперечного сечения автодороги определенному автосамосвалу будет соответствовать определенная ее ширина.

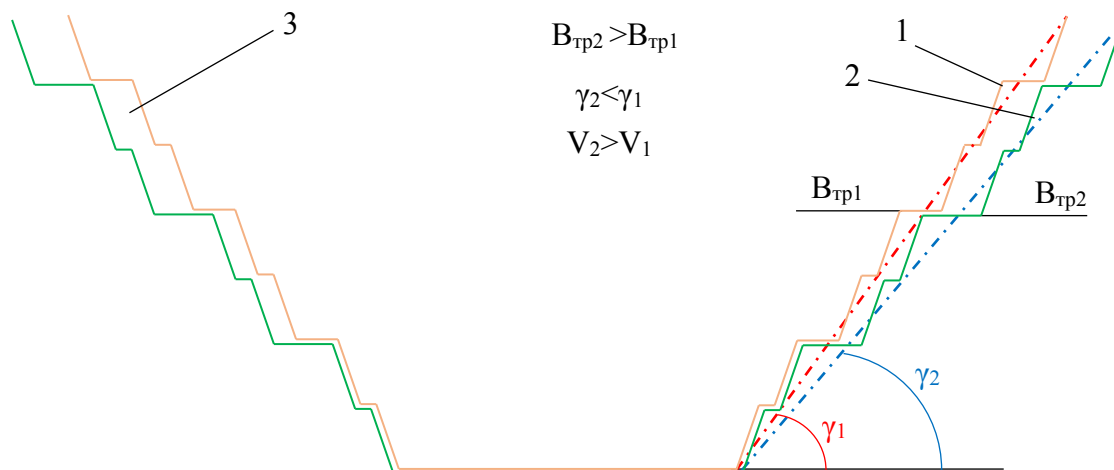


Рис. 1 – Контур карьеров с различными по ширине транспортными бермами: 1 – контур карьера с узкой транспортной бермой; 2 – контур карьера с широкой транспортной бермой; 3 – дополнительно вынимаемый объем пород карьера при увеличении ширины берм

Ключевой характеристикой карьерных автосамосвалов является их грузоподъемность, определяющая производительность транспорта. Поскольку большинство современных карьерных автосамосвалов имеет схожую компоновку, то внутри модельного

ряда каждого из автопроизводителей определенной грузоподъемности соответствуют вполне конкретные массогабаритные характеристики. Наши исследования, проведенные для линейки автосамосвалов БелАЗ, САТ и Komatsu грузоподъемностью 30 – 360 т, это подтвердили (рис. 2). Наиболее «гладкий» график характерен для модельного ряда автосамосвалов БелАЗ.

Таким образом, можно установить четкие закономерности изменения формы карьера и его объема от грузоподъемности применяемых автосамосвалов.

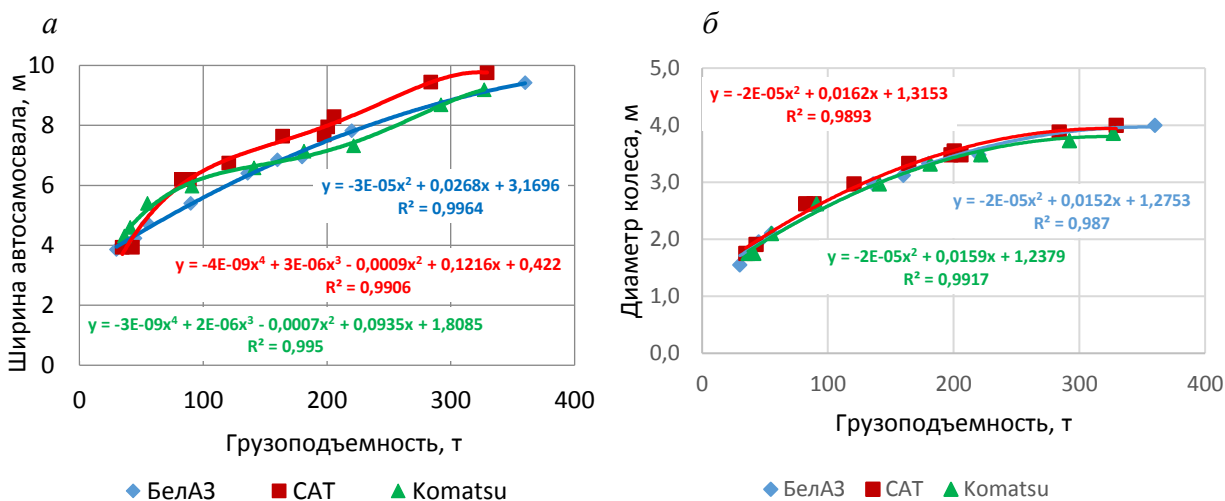


Рис. 2 – Зависимость диаметра колеса (а) и ширины (б) карьерного автосамосвала БелАЗ от грузоподъемности

В ходе исследования было установлено влияние грузоподъемности автосамосвалов через их ширину на основные элементы транспортной бермы (рис. 3), нормируемые СП37.13330.2012:

– проезжая часть и обочина нормированы в зависимости от ширины автосамосвала, а значит, могут быть определены опосредованно и через грузоподъемность самосвалов по зависимости рис. 2а;

– ширина основания породного вала определяется его высотой и углами откоса, поэтому, принимая углы 36° и используя формулы тригонометрии и зависимость диаметра колеса самосвала от грузоподъемности (рис. 2б), можно рассчитать ширину основания.

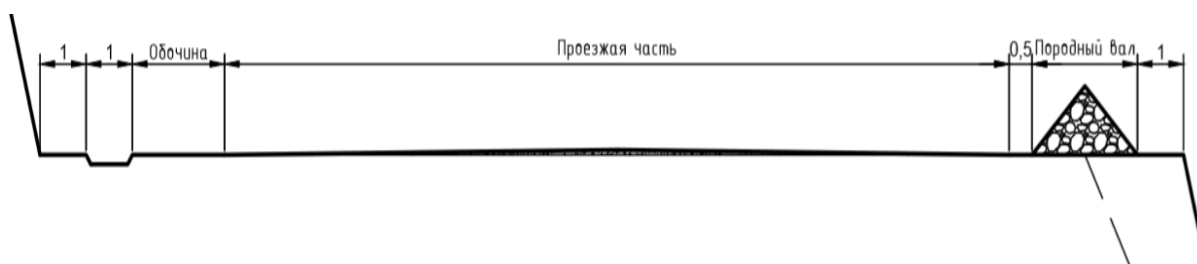


Рис. 3 – Схема поперечного профиля транспортной бермы

В табл. 1 представлены результаты расчета ширины транспортной бермы от грузоподъемности и ширины автосамосвала. Зависимость ширины транспортной бермы от ширины автосамосвала является линейно возрастающей, а от грузоподъемности – степенной возрастающей (рис. 4).

Стоит отметить, что значения, получаемые по этим формулам, будут несколько отличаться от значений, точно определенных по требованиям СП37.13330.2012. Тем не менее установленные зависимости с высокой степенью надежности могут использо-

ваться для укрупненных расчетов при выборе рациональной грузоподъемности автосамосвала и установлении закономерностей влияния типоразмера самосвалов на объем карьера.

Таблица 1

Закономерности влияния ширины и грузоподъемности автосамосвалов БелАЗ на ширину транспортной бермы, рассчитанной по СП 37.1330.2012

Аргумент формул	Категория автодорог			
	Iк	IIк	IIIк	IVк
Ширина автосамосвала, м	$y = 3,9279x + 5,1586$	$y = 3,8551x + 4,8307$	$y = 3,5213x + 5,5627$	$y = 2,0648x + 5,2962$
Грузоподъемность, т	$y = 7,1467x^{0,2967}$	$y = 6,8637x^{0,2995}$	$y = 6,98x^{0,2862}$	$y = 5,3721x^{0,2548}$

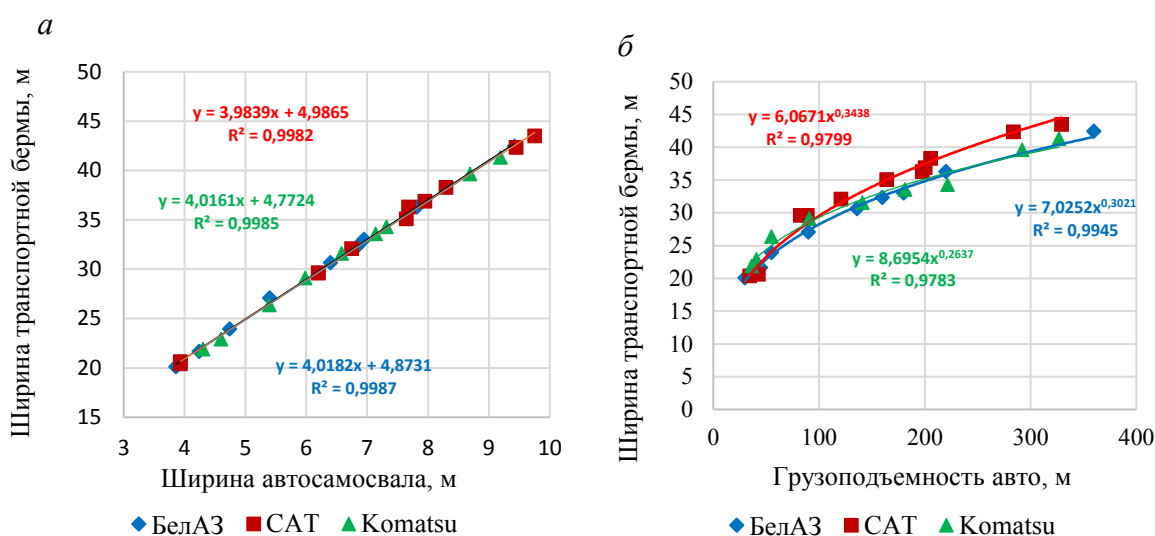


Рис. 4 – Зависимость ширины транспортной бермы от ширины (а) и грузоподъемности (б) автосамосвала для автодорог категории IIк

Далее для решения поставленной задачи необходимо установить взаимосвязь между шириной транспортной бермы, зависящей от грузоподъемности автосамосвалов, и объемом карьера. Ввиду большого разнообразия условий залеганий месторождений, рельефа местности, схем вскрытия (например, внешними траншеями) принято решение ограничиться следующими условиями:

- рассматривался карьер без внешних вскрывающих траншей;
- карьеры имеют округлую или эллипсовидную форму;
- в карьере применяется только автомобильный транспорт без перегрузочных площадок;
- автомобильные съезды имеют спиральную форму трассы и сформированы по требованиям СП 37.1330.2012 (на участках дорог с затяжными продольными уклонами (60 % и более) через каждые 600 м следует устраивать площадки для остановки автомобилей с продольными уклонами до 20 %. Длина площадки должна соответствовать длине расчетного автомобиля, который эксплуатируется на данном участке дороги с увеличением длины площадки по 10 м в каждую сторону);
- расчеты проводились на примере автосамосвалов БелАЗ.

Такой подход обоснован для установления закономерностей. Наиболее же точные результаты в каждом конкретном случае будет давать трехмерное моделирование каждого конкретного карьера.

Анализ разных методик и математических аппаратов, которые могут быть использованы для расчета объема карьера (табл. 2), показал, что наиболее приемлема методика, описанная в диссертационной работе Э.В. Горшкова [9]. Она имеет аналитическое описание и относительно несложный математический аппарат, что важно для реализации в виде расчетной программы и выполнения большого количества расчетов, но при этом учитывает необходимое количество параметров карьера, в том числе относящихся к транспорту (например, ширина и уклон транспортных берм).

Таблица 2

Сравнение методик расчета объема карьера

Методика	Преимущества	Недостатки
Моделирование в ГИС «MineFrame» [11]	<ul style="list-style-type: none">• Высокая точность воспроизведения формы карьера.• Возможность учета объемов карьера сложной формы (внешние траншеи, несколько донных частей и т.п.).	Большая трудоемкость создания моделей карьеров, что важно при рассмотрении большого количества вариантов (десятки и сотни).
Расчет с упрощением до формы усеченного конуса [9]	<ul style="list-style-type: none">• Относительно простая методика, состоящая из последовательно вычисляемых формул.• Учет необходимого количества основных параметров карьера и элементов системы разработки.	<ul style="list-style-type: none">• Учет только карьеров без внешней траншеи и округлой или эллипсоидной формы.• Высокая погрешность (до 20 %) при определенном соотношении параметров карьера и элементов системы разработки.
Расчетная формула справочника «Открытые горные работы» [12]	Предельная простая формула.	<ul style="list-style-type: none">• Не учитываются параметры элементов системы разработки (уступов, берм).
Расчетная формула по В.В. Ржевскому [13]	Предельная простая формула.	<ul style="list-style-type: none">• Высокая погрешность расчета.

Однако методика [9] подразумевает представление карьера в виде усеченного конуса, что дает погрешность в расчетах до 20 % в случаях, когда реальная форма карьера отклоняется от правильных геометрических фигур и количество таких вариантов значительно. Поэтому методика [9] была усовершенствована введением поправки, учитывающей погрешность расчета в зависимости от параметров карьера. Подробно подход к решению вопроса описан в [10]. В рамках данного исследования модель была усовершенствована путем включения карьеров не только округлой, но и эллипсоидной формы. Для этого были отстроены и статистически обработаны дополнительные трехмерные модели карьеров в программном комплексе MINEFRAME [11].

Были смоделированы в общей сложности 286 карьеров. В результате обработки данных методом регрессионного анализа получена следующая формула погрешности в зависимости:

$$\Delta = 0,06004052 + 0,00130347Ш_{т} - 0,15968667i + 0,00087879h_{y} + \\ + 0,00164292\alpha - 0,00069035a + 0,00033342b - 0,00010446H$$

где Δ – среднестатистическое отклонение объема карьера, вычисленного по методике [9], от объема трехмерной компьютерной модели, учитывающей точное воспроизведение карьера поуступно, доли ед.;

$Ш_{т}$ – ширина транспортной бермы, м;

i – средневзвешенный уклон карьера, доли ед.;

h_{y} – высота уступа, м;

α – угол откоса уступа, град.

a – ширина дна карьера, м;

b – длина дна карьера, м;

H – глубина карьера, м.

Результирующий объем карьера вычисляется по следующей формуле:

$$V = \frac{V'}{1-\Delta}, \text{ м}^3,$$

где V' – значение объема, вычисленное по [9], м^3 .

После применения данной поправки к аналитическим расчетам объема карьера относительная погрешность снизилась в среднем с 17,39 до 2,68 %.

С использованием описанной методики аналитически был рассчитан объем для различных карьеров с транспортными бермами, соответствующими каждой грузоподъемности из линейки автосамосвалов БелАЗ (30, 45, 60, 90, 136, 160, 180, 240, 360 т), и установлены закономерности влияния грузоподъемности автосамосвалов на объем карьера.

Анализ результатов исследований

Изменение объема карьера с изменением грузоподъемности применяемых на технологических перевозках автосамосвалов связано с различным углом откоса бортов карьера (см. рис. 1). Чем большего типоразмера автосамосвал, тем больше ширина транспортных берм, меньше угол ботов, а значит, возрастает объем карьера.

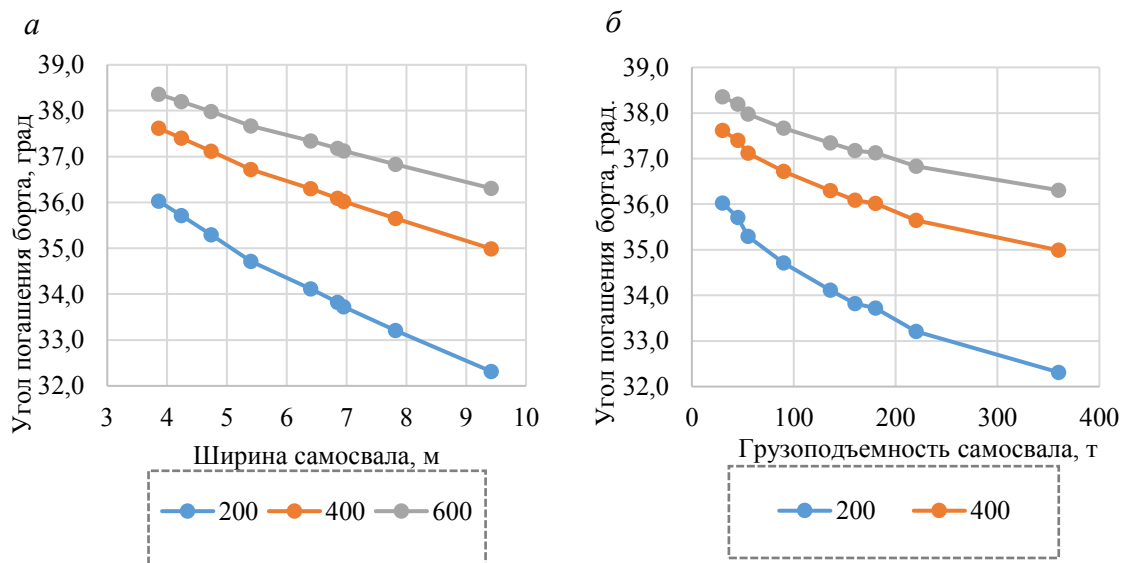


Рис. 5 – Изменение угла погашения борта в зависимости от ширины (а) и грузоподъемности (б) автосамосвала (дно округлое диаметром 100 м)

Расчеты показали, что увеличение ширины автосамосвала вызывает практически линейное падение угла откоса бортов карьера (рис. 5а). А вот в зависимости от грузоподъемности самосвала угол откоса изменяется с некоторой нелинейностью, увеличиваясь все более интенсивно для более узких машин (рис. 5б). Это связано с нелинейной зависимостью ширины автосамосвала от грузоподъемности (см. рис. 4б).

С ростом грузоподъемности автосамосвалов закономерно возрастает и объем карьера (рис. 6). Так, при конечной глубине карьера 500 м и замене автосамосвалов 90-тонных на 136-тонные увеличение объема вскрыши составит 3,4 %. Следовательно, применение автосамосвалов большей грузоподъемности оправдано только тогда, когда рост производительности и снижение себестоимости 1 ткм превосходит негативное влияние роста объема вскрыши.

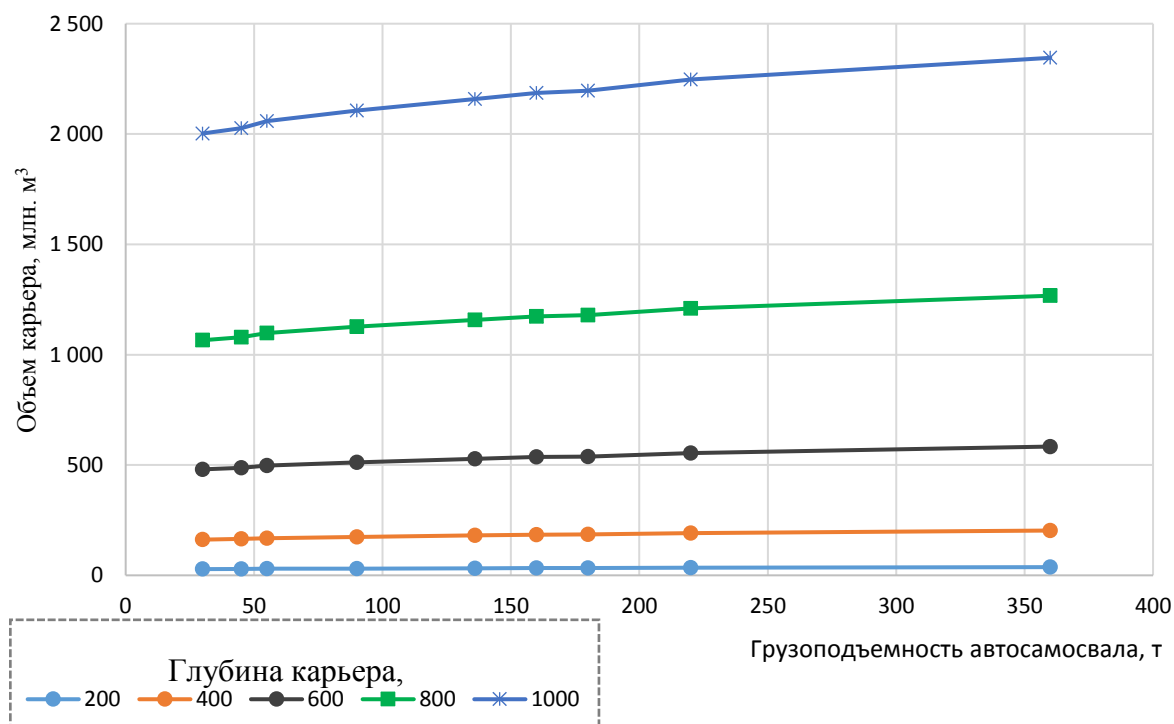


Рис. 6 – Графики зависимостей объемов карьеров от грузоподъемностей автосамосвалов при различных их глубинах (дно округлое диаметром 100 м)

Поскольку зависимость объема карьера от грузоподъемности автосамосвалов близка к линейной, то среднее приращение объема на 1 т (1 м) изменения его грузоподъемности (ширины) есть величина постоянная. Следовательно, можно оперировать изменением объема карьера для различных его параметров в расчете на 1 м ширины и на 1 т грузоподъемности, что удобнее для больших массивов данных. Результаты таких расчетов представлены на рис. 7. Хорошо видно, что темпы нарастания объема меньше у карьера, имеющего большие уклоны съездов, а также углы откосов уступов.

Также установлена интересная закономерность: с ростом глубины карьера становится менее интенсивным приращение угла откоса борта на каждый метр изменения ширины применяемых для транспортирования горной массы автосамосвалов (рис. 8). Это связано с уменьшением количества витков спиральной трассы автодорог на верхних горизонтах за счет большого диаметра, а, следовательно, доля транспортных берм в общем количестве уступов при большой глубине и разnose борта становится мала. В пользу этой версии говорит и то, что, например, в работе С.Л. Бабаскина [14] также описывается влияние транспортных берм со спиральной формой трассы на угол откоса борта карьера для глубинных горизонтов.

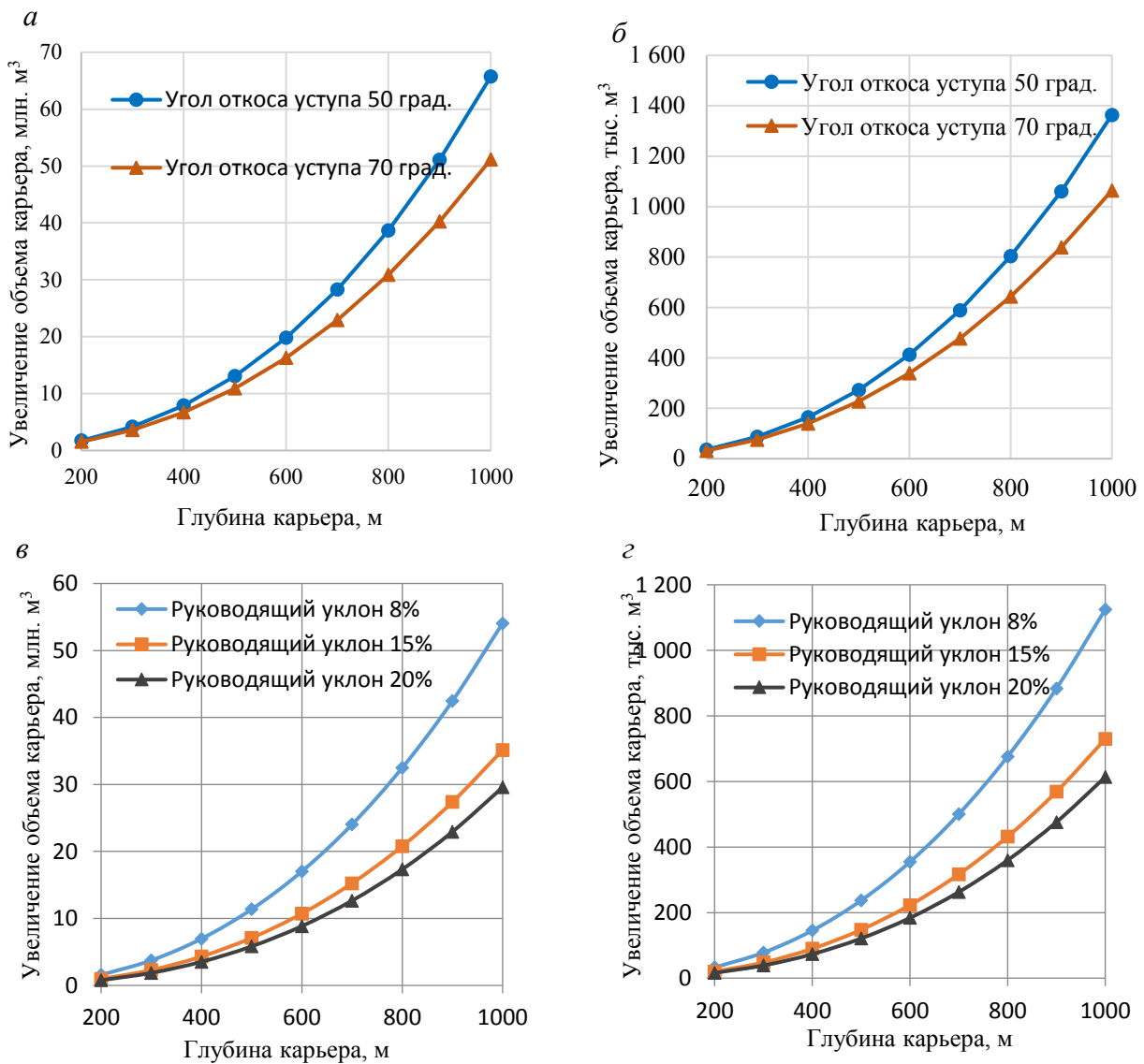


Рис. 7 – Возрастание объема карьера при увеличении ширины автосамосвала на 1 м (а, в) и грузоподъемности на 1 т (б, г) (дно округлое диаметром 100 м)

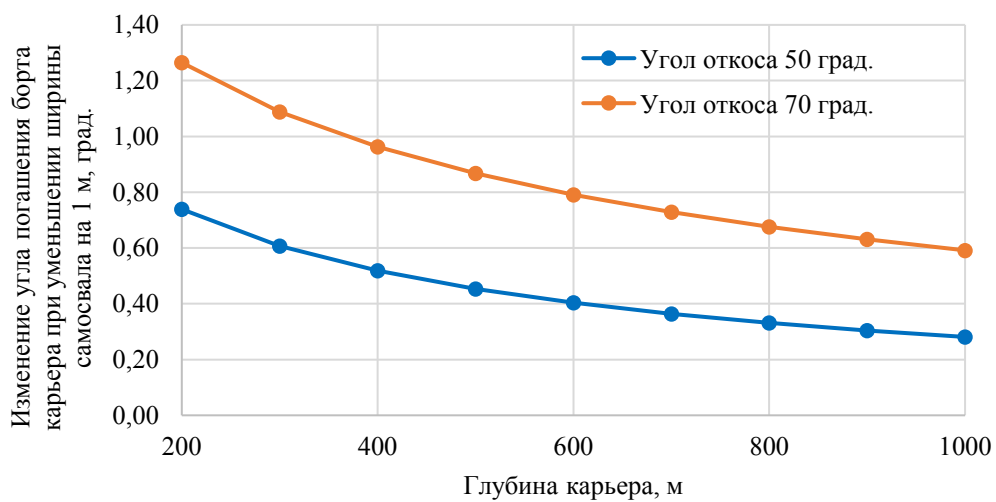


Рис. 8 – Среднестатистическое уменьшение угла откоса борга карьера для различной его глубины при уменьшении ширины применяемых автосамосвалов на 1 м (дно карьера округлое диаметром 100 м)

И тем не менее темп увеличения объема карьера с глубиной возрастает (см. рис. 7). Это объясняется тем, что основной объем карьера сосредоточен в верхней части, и при большой глубине диаметр карьера по поверхности, а значит, и его объем значительны. Таким образом, даже незначительное уменьшение угла откоса бортов для глубоких карьеров дает большой эффект по вскрыше.

Таким образом, важно правильно выбирать грузоподъемность (типоразмер) технологических карьерных автосамосвалов, учитывая не только их производительность, но и ширину транспортных берм и их влияние на конечный контур карьера и дополнительный разнос бортов.

Выводы

1. Разработана методика, позволяющая выполнять расчеты объема карьера округлой или эллипсоидной формы без внешних траншей со спиральной формой трассы в зависимости от параметров транспортных берм и грузоподъемности автосамосвалов. Для указанных допущений погрешность расчетов составляет в среднем не более 3 % (максимальное отклонение не более 10 %).

2. Существует надежная взаимосвязь между грузоподъемностью карьерного автосамосвала и его шириной, а следовательно, грузоподъемность прямо пропорционально влияет на объем карьера в конечном контуре посредством ширины транспортных берм. Установлена такая взаимосвязь для модельного ряда автосамосвалов БелАЗ.

3. Увеличение ширины применяемых в карьере автосамосвалов приводит к снижению углов откоса бортов карьера по обратно пропорциональной зависимости. При этом установлено: чем больше глубина карьера, тем меньше это влияние на верхних горизонтах ввиду того, что количество витков транспортной бермы в верхней части за счет большого диаметра карьера по поверхности снижается и их доля в разnose борта становится меньше.

4. Наиболее интенсивно изменение типоразмера автосамосвалов сказывается на карьерах большой глубины. Так, для карьера глубиной 400 м и диаметром дна 100 м на каждую тонну увеличения грузоподъемности автосамосвалов в среднем приходится 165 тыс. м³ дополнительного объема вскрыши, а для карьера глубиной 800 м – уже 803 тыс. м³.

5. Применение автосамосвалов большой грузоподъемности оправданно только тогда, когда рост производительности и снижение себестоимости 1 ткм превосходит негативное влияние роста объема вскрыши. Необходима разработка прикладной методики, позволяющей провести технико-экономическое сравнение выгод и убытков от изменения грузоподъемности технологических автосамосвалов и выбрать оптимальное сочетание типоразмера автосамосвалов и формы карьера.

Литература

1. Забелин В.В. Параметры карьерных дорог / В.В. Забелин, И.В. Зырянов, Ю.М. Шаповалов // Горная промышленность. – 2015. – № 5. – С. 43.
2. Углубочный комплекс для доработки кимберлитовых карьеров / В.Л. Яковлев, П.И. Тарасов, В.О. Фурин, И.В. Зырянов. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2015. – 268 с.
3. Конструктивные схемы гусеничных самосвалов для работы в карьерах с повышенными уклонами выработок / П.И. Тарасов, А.В. Глебов, В.О. Фурин, А.Г. Ворошилов, С.В. Лобанов, В.М. Неволин // Горная промышленность. – 2008. – № 2. – С. 63 - 68.
4. Тарасов П.И. Обоснование технологических параметров углубочного комплекса / П.И. Тарасов, А.Г. Журавлев, В.О. Фурин // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 9. – С. 2 - 10.
5. Сисин А.Г. Влияние вида транспорта на объем карьера / А.Г. Сисин, В.А. Берсенева, М.Д. Вознесенский // Труды института «УНИПРОМЕДЬ». Вып. XX. – Свердловск: УНИПРОМЕДЬ, 1977. – С. 36 - 40.

6. Любимов В.Н. Влияние роста грузоподъемности автосамосвалов на параметры карьеров / В.Н. Любимов // Интенсификация технологических процессов добычи угля открытым способом. Научные сообщения ИГД им. А.А. Скочинского, вып. 226. – М.: ИГД им. А.А. Скочинского, 1972. – С. 73 - 76.
7. Технологические схемы перехода на новые модели автосамосвалов при доработке глубоких карьеров / Ю.И. Лель, А.В. Глебов, Д.Х. Ильбульдин, О.В. Мусихина, С.А. Дунаев // Известия вузов. Горный журнал. – 2015. – № 8. – С. 4 - 12.
8. Вилкул Ю.Г. Теоретические основы определения объемов горно-капитальных работ при вскрытии глубоких карьеров трассами спиральной формы // Ю.Г. Вилкул, В.К. Слободянюк, И.И. Максимов. – Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 7. – С. 17 - 23.
9. Горшков Э.В. Обоснование рациональных параметров технологического автотранспорта при повышенных уклонах карьерных автодорог: дис. ... канд. техн. наук / Э.П. Горшков; ИГД МЧМ СССР. – Свердловск, 1984. – 178 с.
10. Буднев А.Б. Оценка погрешностей некоторых аналитических методов расчета объема карьера / А.Б. Буднев, А.Г. Журавлёв // Проблемы недропользования. – 2017. – № 4. – С. 85 - 95. DOI: 10.18454/2313-1586.2017.04.061
11. Наговицын О.В. Автоматизированные инструменты инженерного обеспечения горных работ в системе MINEFRAME / О.В. Наговицын, С.В. Лукичев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2013. – № 7. – С. 184 – 192.
12. Справочник. Открытые горные работы / К.Н. Трубецкой, К.Е. Веницкий, Н.Н. Мельников и др. – М: Горное бюро, 1994. – 590 с.
13. Ржевский В.В. Процессы открытых горных работ / В.В. Ржевский. - Изд. 3-е, перераб. и доп. - М: Недра, 1978. – 541 с.
14. Бабаскин С.Л. Оптимизация конструкции бортов в нижней части кимберлитовых карьеров за счет применения новой технологии горных работ / С.Л. Бабаскин // Проблемы карьерного транспорта. Материалы IX международной научно-практической конференции, 9 - 12 октября 2007 г. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – С. 33 – 38.