

УДК 622.271.004.94

Буднев Алексей Борисович

лаборант лаборатории
транспортных систем карьеров и геотехники,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: a.budnev@igduran.ru

Журавлев Артем Геннадиевич

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией
транспортных систем карьеров и геотехники,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: juravlev@igduran.ru

**ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ НЕКОТОРЫХ
АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ОБЪЕМА КАРЬЕРА***Аннотация:*

При обосновании параметров транспортных систем карьеров часто требуется оценить влияние выбранного вида транспорта на форму и объем карьеров, в частности влияние на них дополнительно извлекаемых объемов вскрыши для размещения транспортных коммуникаций в бортах карьера. В статье приведено сравнение аналитических методик расчета объема в зависимости от его параметров по погрешности расчетов. Сравнение проводилось с данными трехмерного компьютерного моделирования в среде MineFrame. Установлены закономерности изменения погрешности и предложен способ повышения точности расчетов за счет учета систематической погрешности. Проверочные расчеты показали сходимость результатов предложенного метода с погрешностью не более 4 %.

Ключевые слова: трехмерное компьютерное моделирование карьера, погрешность расчетов, объем карьера, параметры карьера, MineFrame

DOI: 10.18454/2313-1586.2017.04.061

Budnev Alexey B.

laboratory worker,
the Institute of mining UB RAS,
620075, Yekaterinburg,
58 Mamin-Sibiryak st.
e-mail: a.budnev@igduran.ru

Zhuravlev Artem G.

candidate of technical sciences,
chief of laboratory,
the Institute of mining UB RAS
e-mail: [Juravlev@igduran.ru](mailto:juravlev@igduran.ru)

**THE ESTIMATE OF ERRORS
OF SOME ANALYTICAL METHODS
OF PIT VOLUME CALCULATION***Abstract:*

For grounding the parameters of open pit transport systems it is often required to estimate the impact of the selected solution on the shape and volume of the pits, additionally extracted the overburden in particular to accommodate transport and communications at the pit. The article presents the comparison of analytical methods of volume calculation depending on its parameters according to the calculation errors. The comparison was conducted with data of three-dimensional computer modeling in Mine Frame. The regularities of changing errors are determined and the method is proposed to improve the accuracy of the calculations by taking into account the systematic errors. Test calculations have shown the convergence of the results of the proposed method with error not exceeding 4%.

Key words: three-dimensional computer pit modeling, the accuracy of calculations, the pit volume, options, pit parameters, Mine Frame.

При проектировании карьеров в предпроектной стадии возникает необходимость быстрой оценки их объемов для выбора наилучшего варианта, соответствующего оптимальным размерам, минимальным объемам вскрышных пород и обеспечивающего технико-экономическую эффективность предприятия. Аналогичные задачи возникают и в исследованиях, особенно при обосновании параметров транспортных систем карьеров, когда требуется оценить влияние выбранного вида транспорта на форму и объем карьеров, в частности дополнительно извлекаемой вскрыши для размещения транспортных коммуникаций в бортах карьера [1]. Важно использовать комплексный подход, увязывающий расчеты и компьютерное моделирование непосредственно карьерного транспорта [2] и его влияние на карьер, особенно при решении задач для специфичных схем вскрытия [3] и учета сложных переходных процессов при формировании карьера [4].

Для проведения такой оценки может использоваться трехмерное компьютерное моделирование с последующим автоматическим вычислением объема или аналитические методы, основанные на последовательных вычислениях по заданным формулам.

Трехмерное компьютерное моделирование сегодня широко распространено при проектировании карьеров [5] и в исследованиях, оно дает результат высокой точности, особенно для карьеров сложной формы, однако занимает большее время, чем упрощенные аналитические расчеты. В свою очередь, упрощенные аналитические методы могут быть хорошим инструментом для укрупненной оценки, если будут давать приемлемый по погрешности результат для карьеров при существенном сокращении трудоемкости расчетов.

Существует немало широко известных подходов и алгоритмов укрупненного расчета объема карьера, например [6, 7]. Есть и специальные методики расчетов, направленные на учет влияния тех или иных факторов, в частности параметров транспортных берм [8, 9].

Именно специальные расчеты и могут быть подспорьем при экспресс-оценке и выборе рациональных вариантов карьеров при варьировании параметров элементов системы разработки и схемы вскрытия.

Благодаря появлению компьютерных программ трехмерного моделирования есть возможность оценки точности упрощенных аналитических методов расчета объема карьера.

Сравним точность расчета объема карьера по двум специальным методикам: методике, приведенной в диссертации Горшкова Э.В. [8], основанной на аналитически выведенных уравнениях, и методике, основанной на использовании регрессионных зависимостей [9]. Затем повысим точность одной методики, которая будет давать лучшие результаты.

Сутью методики [8] является представление карьера в виде усеченного эллипсоидного конуса, угол наклона образующей которого совпадает с углом погашения борта карьера. При этом угол вычисляется в зависимости от параметров площадок, уступов, а также уклонов транспортных берм.

Второй подход [9] основан на использовании математических моделей (набора зависимостей), выведенных по результатам регрессионного статистического анализа параметров карьеров с прямоугольным дном, отстроенных путем трехмерного моделирования.

Оба метода предполагают наличие спиральной формы съездов в карьере.

Для оценки точности этих двух методов в качестве исходных моделей было отстроено 16 вариантов карьеров с эллипсоидным дном и 16 вариантов с прямоугольным дном (рис. 1). Исходные данные, одинаковые для всех моделируемых карьеров, приведены в табл. 1. При построениях варьировались глубина карьера, высота уступа и уклон автодорог, размещаемых на бортах карьера. Все построения и измерения были выполнены в программе трехмерного моделирования карьеров MINEFRAME [10]. Полученные по результатам трехмерного моделирования объемы приняты за эталонные.

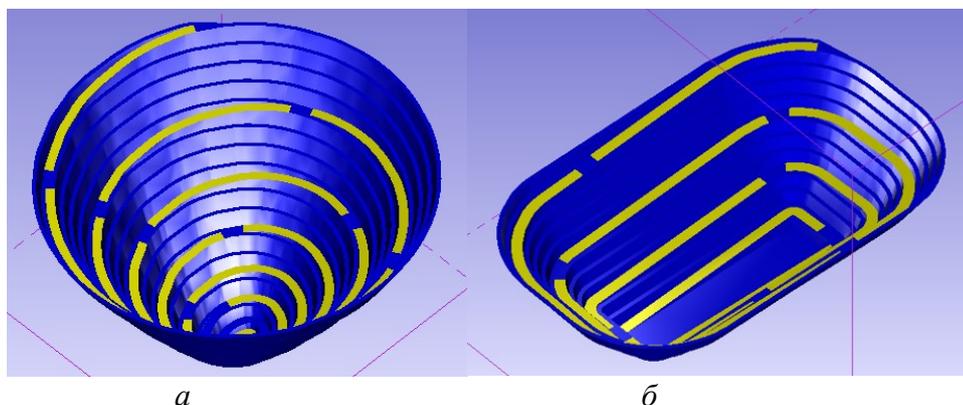


Рис. 1 – Внешний вид трехмерных моделей карьера в программе MINEFRAME:
а – с эллипсоидным дном, *б* – с прямоугольным дном

Таблица 1

Общие исходные данные построения карьеров

| Параметр | Карьер с эллипсовидным дном | Карьер с прямоугольным дном |
|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Форма трассы | Спиральная | Спиральная |
| Примыкание трассы к горизонту | Горизонтальное | Горизонтальное |
| Длина примыкания, м | 50 | 50 |
| Размер дна, м | 100×50 | 500×100 |
| Высота уступа, м | 45 | 30,20,15 |
| Угол откоса уступа, град | 75 | 75 |
| Ширина транспортной бермы, м | 22 | 25 |
| Ширина бермы безопасности, м | 10 | 10 |

По приведенным исходным данным были рассчитаны объемы карьеров по обоим методикам, а также вычислены погрешности по отношению к эталонному объему (3D-модели в MINEFRAME). Результаты приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Расчет погрешностей для карьеров с эллипсовидным дном

| № | Уклон съездов, ‰ | Глубина, м | Эталонный объем, тыс. м ³ | Объем по методике [8], тыс. м ³ | Объем по методике [9], тыс. м ³ | Относительная погрешность по методу [8], % | Относительная погрешность по методу [9], % |
|----|------------------|------------|--------------------------------------|--|--|--|--|
| 1 | 80 | 90 | 2 312 | 2 036 | 2 044 | 11,9 | 11,6 |
| 2 | 80 | 135 | 5 408 | 4 845 | 4 510 | 10,4 | 16,6 |
| 3 | 80 | 315 | 35 094 | 33 514 | 32 977 | 4,5 | 6,0 |
| 4 | 80 | 630 | 190 431 | 184 351 | 133 950 | 3,2 | 29,7 |
| 5 | 200 | 90 | 1 482 | 1 425 | 1 729 | 3,9 | 16,7 |
| 6 | 200 | 135 | 3 493 | 3 429 | 3 785 | 1,8 | 8,4 |
| 7 | 200 | 315 | 24 326 | 25 184 | 24 306 | 3,5 | 0,1 |
| 8 | 200 | 630 | 135 478 | 148 601 | 97 417 | 9,7 | 28,1 |
| 9 | 300 | 90 | 1 299 | 1 259 | 1 496 | 3,1 | 15,2 |
| 10 | 300 | 135 | 3 048 | 3 046 | 3 254 | 0,1 | 6,7 |
| 11 | 300 | 315 | 21 461 | 22 929 | 19 600 | 6,8 | 8,7 |
| 12 | 300 | 630 | 122 158 | 138 985 | 77 687 | 13,8 | 36,4 |
| 13 | 450 | 90 | 1 188 | 1 177 | 1 192 | 0,9 | 0,2 |
| 14 | 450 | 135 | 2 777 | 2 856 | 2 565 | 2,8 | 7,6 |
| 15 | 450 | 315 | 19 686 | 21 814 | 14 397 | 10,8 | 26,9 |
| 16 | 450 | 630 | 113 727 | 134 260 | 56 119 | 18,1 | 50,7 |

Таблица 3

Расчет погрешностей для карьеров с прямоугольным дном

| № | Уклон съездов, % | Высота уступа, м | Глубина карьера, м | Эталонный объем, тыс.м ³ | Объем по методу [8], тыс. м ³ | Объем по методу [9], тыс. м ³ | Относительная погрешность по методу [8], % | Относительная погрешность по методу [9], % |
|----|------------------|------------------|--------------------|-------------------------------------|--|--|--|--|
| 1 | 50 | 30 | 300 | 85 257 | 68 055 | 98 735 | 20,2 | 15,8 |
| 2 | 50 | 30 | 150 | 22 474 | 18 190 | 21 057 | 19,1 | 6,3 |
| 3 | 80 | 30 | 300 | 74 073 | 59 855 | 87 902 | 19,2 | 18,7 |
| 4 | 80 | 30 | 150 | 20 079 | 16 195 | 20 079 | 19,4 | 0,0 |
| 5 | 100 | 30 | 300 | 70 689 | 57 063 | 82 349 | 19,3 | 16,5 |
| 6 | 100 | 30 | 150 | 19 332 | 15 518 | 19 447 | 19,7 | 0,6 |
| 7 | 50 | 20 | 300 | 98 918 | 69 802 | 125 208 | 29,4 | 26,6 |
| 8 | 50 | 20 | 150 | 25 242 | 18 732 | 26 342 | 25,8 | 4,4 |
| 9 | 80 | 20 | 300 | 90 365 | 61 609 | 110 501 | 31,8 | 22,3 |
| 10 | 80 | 20 | 150 | 23 312 | 16 737 | 25 018 | 28,2 | 7,3 |
| 11 | 100 | 20 | 300 | 87 670 | 58 822 | 103 002 | 32,9 | 17,5 |
| 12 | 100 | 20 | 150 | 22 704 | 16 060 | 24 162 | 29,3 | 6,4 |
| 13 | 50 | 15 | 300 | 120 033 | 71 128 | 139 547 | 40,7 | 16,3 |
| 14 | 50 | 15 | 150 | 29 277 | 19 115 | 29 160 | 34,7 | 0,4 |
| 15 | 80 | 15 | 300 | 108 968 | 62 951 | 122 550 | 42,2 | 12,5 |
| 16 | 80 | 15 | 150 | 28 553 | 17 121 | 27 623 | 40,0 | 3,3 |

* За эталонный принят объем карьера, измеренный по 3D-модели карьера, отстроенной в MINEFRAME

Общая закономерность изменения объема в зависимости от уклона автодорог по данным трехмерного моделирования представлена на рис. 2. Видно, что объем карьера снижается при возрастании уклона транспортных берм, что объясняется сокращением протяженности съездов, размещаемых на бортах и, соответственно, увеличением углов откоса бортов.

Из графиков изменения погрешностей расчета объема от глубины карьера при различных уклонах (рис. 3, 4) видно, что на большинстве из них погрешность возрастает с увеличением глубины.

Анализируя полученные результаты, можно заметить такую закономерность: для карьеров с эллипсовидным дном наименьшую погрешность дает методика [8], с прямоугольным – методика [9]. Следовательно, на точность расчетов объема карьера существенное влияние оказывает форма дна.

Но даже при правильно выбранной методике значения погрешностей все равно велики (до 18,06 % по методике [8] и до 26,58 % по методике [9]). Таким образом, даже правильно выбранный для данного случая аналитический метод расчета объема карьера дает сильно разнящийся с реальностью результат и, следовательно, не может дать достоверной оценки.

Стоит отметить, что методика [9] дает большой разброс значений погрешностей для отдельных вариантов карьеров: для одних она находится на уровне 1 %, для других – на уровне 20 – 30 %, причем количество «средних» значений минимально. Это говорит о необходимости доработки данной методики.

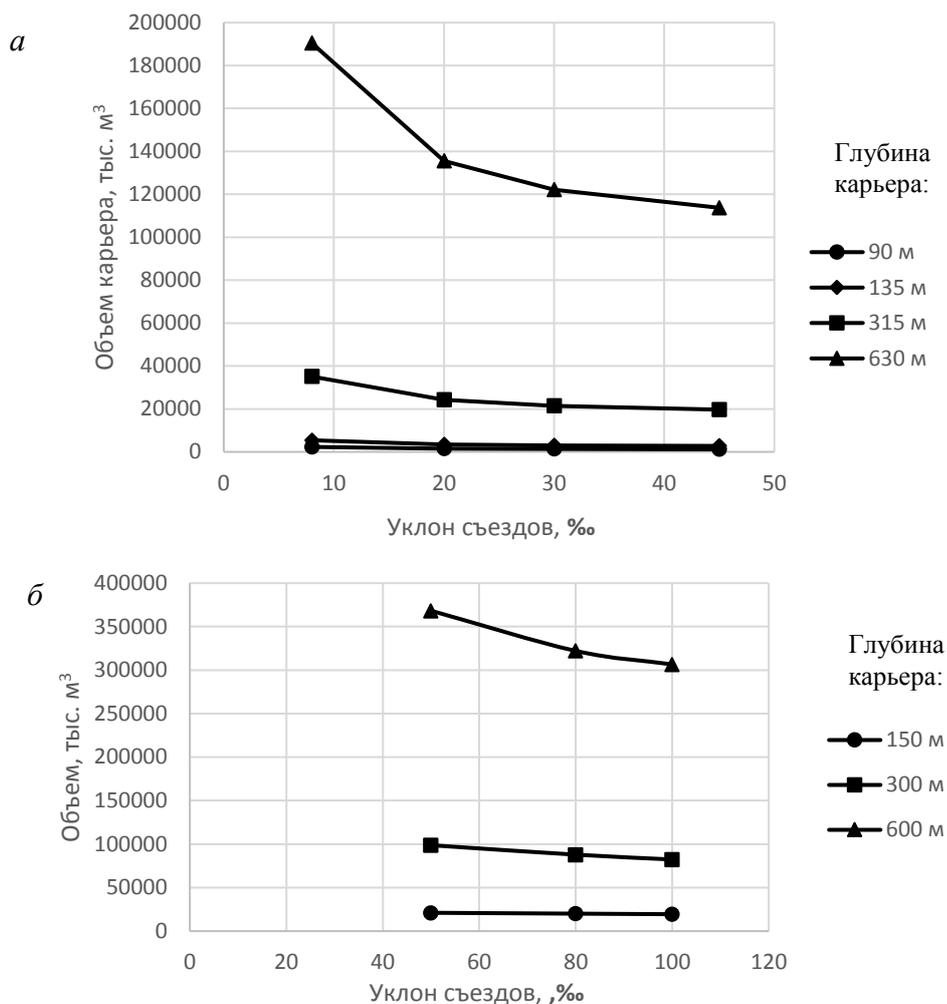


Рис. 2 – Зависимость объема карьера от уклона и глубины при разной форме дна карьера: а – при эллипсовидной, б – при прямоугольной

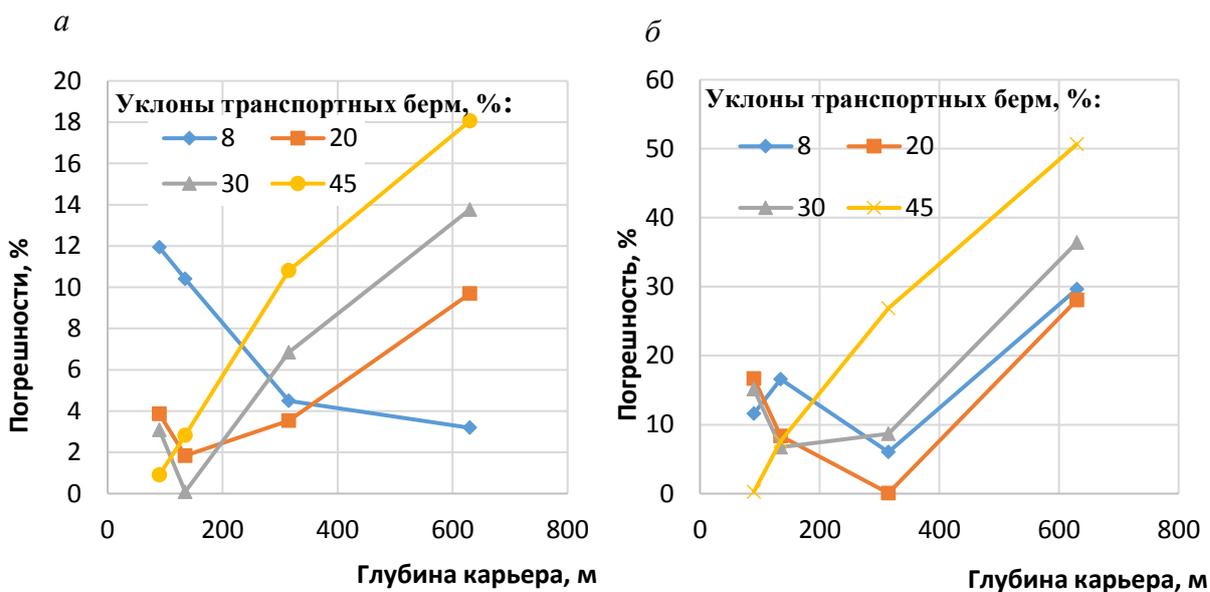


Рис. 3 – Изменение погрешностей расчета объема карьера по методикам [8] (а) и [9] (б) в зависимости от глубины карьера при разных уклонах транспортных берм

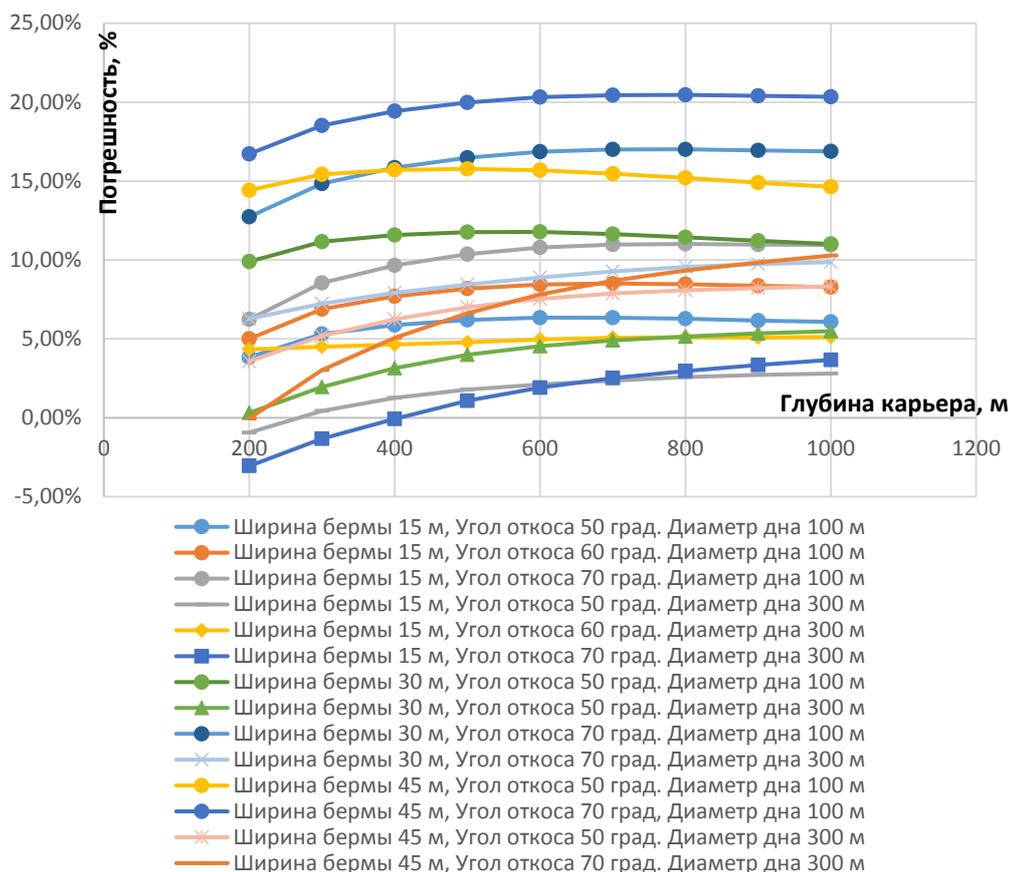


Рис. 4 – Графики изменения погрешности аналитического метода [8] в зависимости от глубины карьера и других параметров

Методика [8] дает приемлемые результаты и удобна в применении, однако погрешность при определенных сочетаниях параметров карьера достигает 18 %, что существенно. По результатам моделирования и расчетов было замечено, что значения погрешностей коррелируют с параметрами горных выработок. Например, на рис. 3 погрешность коррелирует с глубиной и уклонами съездов карьера. Следовательно, погрешность носит систематический характер, а значит, может быть математически описана и учтена в расчетах. Повышение точности таким способом позволит иметь достаточно простую аналитическую методику вычислений с хорошими показателями точности.

С этой целью с помощью программы Microsoft Excel, по методике Горшкова Э.В. [8], были рассчитаны 567 вариантов карьеров, имеющих различные параметры, диапазон варьирования которых приведен в табл. 4. Карьеры имели округлое дно, спиральную форму трассы, площадки примыкания автомобильных съездов устраивались на каждом уступе и были приняты согласно нормам СП37.13330.2012. Аналогичное количество карьеров было промоделировано в программе MINEFRAME.

Таблица 4

Значения принятых параметров всего многообразия рассмотренных карьеров

| Параметр построения карьера | Значения параметра |
|------------------------------|--|
| Ширина транспортной бермы, м | 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 |
| Уклон съезда, % | 8 |
| Высота уступа, м | 15 |
| Угол откоса уступа, град. | 50, 60, 70 |
| Ширина берм очистки, м | 15 |
| Диаметр круглого дна, м | 100, 200, 300 |
| Глубина карьера, м | 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000 |

В качестве истинных значений приняты объемы моделей карьеров, построенных в программе трехмерного моделирования MINEFRAME. Значения объемов, рассчитанные по методике [8], принимались как значения, подлежащие уточнению. В результате исследований установлены закономерности изменения погрешности расчетов в зависимости от параметров карьера. Графически некоторые из них приведены на рис. 4.

По указанным данным установлена зависимость изменения погрешности расчетов от параметров карьера с помощью встроенной функции «Регрессия» в программе Microsoft Excel.

Зависимость имеет следующий вид:

$$\Delta = -0,0185 + 0,00235 * Ш_6 + 0,00144 * \alpha - 0,000371 * D_d + 0,0000426 * H,$$

где Δ – относительная погрешность аналитического метода, доли ед.;

$Ш_6$ – ширина транспортной бермы, м;

α – угол откоса уступа, град.;

D_d – диаметр дна карьера, м;

H – глубина карьера, м.

В результате, благодаря выведенной формуле, легко получить погрешность для любого сочетания параметров карьера и далее использовать ее как поправку к расчетным значениям объема карьера.

Новое значение объема будет выглядеть так:

$$V' = \frac{V}{1 - \Delta'}$$

где V' – значение объема после внесения поправки, м³;

V – значение объема, вычисленное аналитическим методом [7], м³.

Результаты корректировки систематической погрешности оценены путем сравнения с истинными значениями объема (объем моделей в MINEFRAME) по остаточной погрешности, значения которой теперь не превышают 4 %. На рис. 5 для примера приведены остаточные погрешности при различной глубине карьеров и ширине транспортных берм. Расчетный объем отличается от истинного как в большую, так и в меньшую сторону, что объясняется многочисленными сложными взаимосвязями и истинными закономерностями, которые сложно описать математически с высокой точностью в рамках простой расчетной методики.

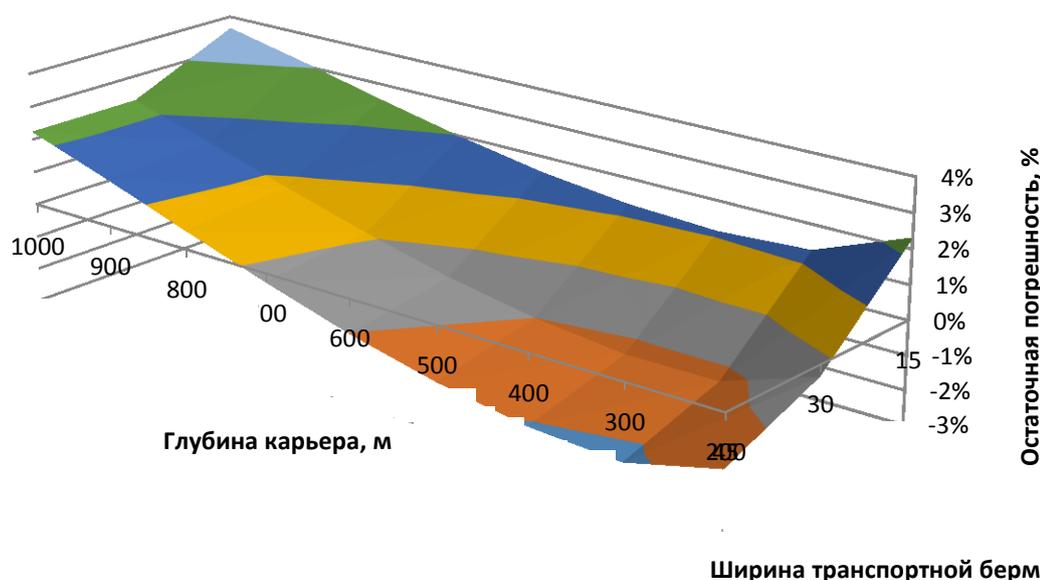


Рис. 5 – Трехмерный график остаточной погрешности аналитического расчета объема карьера по уточненной методике [8] в зависимости от глубины карьера и ширины транспортной бермы

Преимущество уточненной методики [8] в том, что относительно несложные расчетные формулы могут быть встроены в любые алгоритмы, где требуется сравнить большое количество вариантов или установить закономерности при хорошей точности. Это важно, например, при проектировании карьеров или в исследованиях при установлении не качественных, а количественных закономерностей и зависимостей.

Такие задачи часто возникают при обосновании параметров транспортных систем карьеров, когда наряду с расчетом технико-экономических показателей непосредственно транспорта необходимо сравнивать влияние вида транспорта на схему вскрытия и в конечном итоге объема карьера.

Для сведения, зависимость объема от изменения таких параметров, как глубина, ширина транспортной бермы, диаметр дна карьера, угол откоса уступа при прочих равных условиях показаны на поверхностях, приведенных на рис. 6.

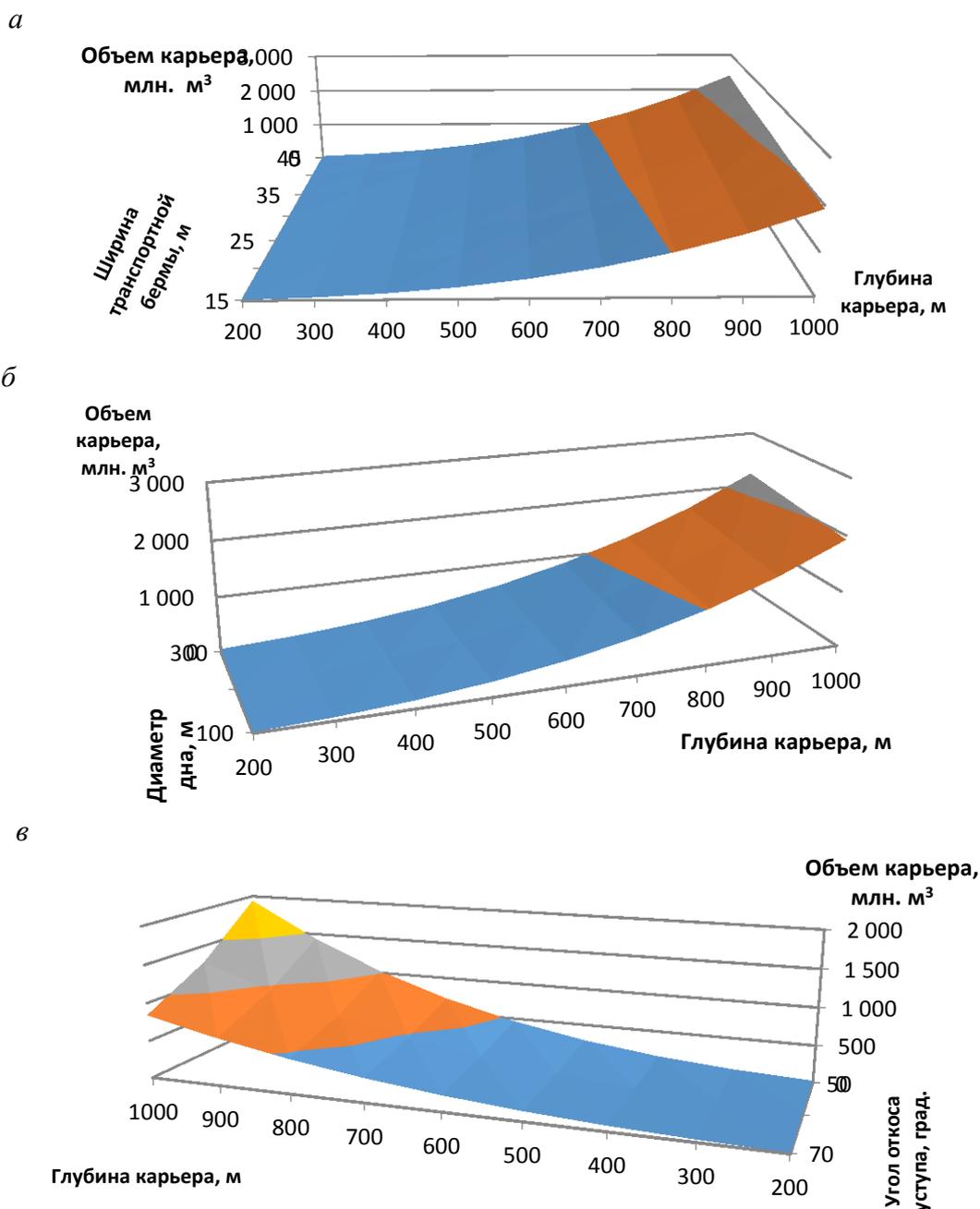


Рис. 6 – Результаты расчета объема карьера по уточненной методике при разной его глубине в зависимости от *a* – ширины транспортной бермы, *б* – диаметра дна карьера, *в* – угла откоса уступа

Таким образом, аналитические методы расчета объема карьера являются более быстрым способом оценки (экспресс-оценки) по сравнению с трехмерным моделированием, что важно при выборе из большого количества вариантов и создании автоматизированных систем поддержки принятия проектных решений при многовариантном сравнении.

В то же время аналитические методики [8] и [9] в исходном виде дают заметную погрешность до 18 – 26 %.

Методика [9], основанная на корреляционном анализе, предназначена для расчета объема карьеров прямоугольной и близкой к ней формы, однако дает большие погрешности и требует дальнейшей проработки.

Методика [8], основанная на геометрическом описании карьеров с эллипсоидным дном, дает более достоверные результаты, однако в исходном виде погрешность достигает 18 %.

Совершенствование методики [8], проведенное авторами путем внесения корректирующего систематическую погрешность слагаемого, позволило добиться повышения точности во всем диапазоне рациональных значений параметров карьеров (итоговая погрешность не превышает 4 %).

Предложенный способ расчета объемов карьера с корректировкой систематической погрешности позволяет использовать простую методику при хорошей точности (погрешность не более 4 %) для карьеров с округлым дном.

При проектировании оптимальным вариантом по трудоемкости, скорости и точности подсчета объема карьера является комбинирование обоих методов:

- для предварительного отбора вариантов использовать аналитическую методику;
- для дальнейшего рассмотрения применять трехмерное компьютерное моделирование карьера.

Литература

1. Особенности решения транспортных проблем на современном этапе развития горного производства / В.Л. Яковлев, А.Г. Журавлев, Ю.А. Бахтурин, В.А. Черепанов // Горное оборудование и электромеханика. – 2017. – № 2. – С. 11 - 18.
2. Журавлев А.Г. К вопросу обоснования производительности экскаваторно-автомобильных комплексов методом компьютерного моделирования / А.Г. Журавлев, А.В. Скороходов // Проблемы недропользования. – 2015. – № 2. – С. 53 - 60. DOI 10.18454/2313-1586.2015.02.053/
3. Технические и технологические аспекты применения крутонаклонных конвейеров на карьерах / Г.Д. Кармаев, В.А. Берсенева, А.В. Семенкин, И.Г. Сумина // Проблемы недропользования. – 2014. – № 3. – С. 154 – 163.
4. Исследование влияния переходных процессов на эксплуатационные показатели транспортных систем глубоких карьеров / В.Л. Яковлев, Г.Д. Кармаев, В.А. Берсенева, И.Г. Сумина, В.А. Яковлев // Проблемы недропользования. - 2016. - № 4 DOI 10.18454/2313-1586.2016.04.051
5. Наговицын О.В. Создание единой геолого-маркшейдерской информационной среды для планирования открытых горных работ в системе MINEFRAME / О.В. Наговицын, С.В. Лукичев, А.Ю. Алисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2010. - № 2. - С. 336 - 342.
6. Ржевский В.В. Открытые горные работы. Часть I. Производственные процессы: Учебник для вузов в 2-х частях / В.В. Ржевский. – 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1985. – 509 с.
7. Справочник. Открытые горные работы / К.Н. Трубецкой, М.Г. Потапов, К.Е. Виноцкий, Н.Н. Мельников и др. – М.: Горное бюро, 1994. – 690 с.

8. 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.

9. Балтачев С.А. Установление закономерностей влияния технологических параметров карьера на его геометрические параметры / С.А. Балтачев, М.А. Петухов, А.Г. Журавлев // 50 лет Российской научной школе комплексного освоения недр Земли: Сборник трудов Междунар. науч.-практ. конф., 13 - 16 ноября 2017 г. – М.: ИПКОН РАН, 2017. – С. 135 - 141.

10. Мельников Н.Н. Компьютерная технология инженерного обеспечения горных работ на основе системы MINEFRAME / Н.Н. Мельников, С.В. Лукичев, О.В. Наговицын // ГИАБ. - 2013. - № 5. - С. 223 - 234.