

Boymirzayeva Jasmina Ibroxim qizi	– first-year master's student at the department of Mine surveying and geodesy, Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan, e-mail: ibragimovna29@gmail.com
Yarqulova Nozima Ibragim qizi	– first-year master's student at the department of Mine surveying and geodesy, Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan, e-mail: ibragimovna@gmail.com
Navruzova Mohinur Komiljon qizi	– first-year master's student at the department of Mine surveying and geodesy, Tashkent State Technical University, 100095, Tashkent, University Str., 2, Republic of Uzbekistan, e-mail: tojiddinovamokhinur@gmail.com

УПРАВЛЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТЬЮ МНОГОЯРУСНЫХ ОТВАЛОВ КАРЬЕРОВ ПУТЁМ ОПТИМИЗАЦИИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРИВОЛИНЕЙНОГО ФРОНТА В ПЛАНЕ

Умаров Ф.Я., Каримов Ш.В., Норов Д.Ш.

*Филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСИС» в г. Алмалык
Навоийский инновационный университет, Республика Узбекистан*

Doi: 10.5281/zenodo.20280068

АННОТАЦИЯ

В статье представлены результаты теоретического обоснования геометрических параметров криволинейного фронта многоярусных отвалов в плане как фактора управления устойчивостью. Установлена обратная степенная зависимость зоны захвата оползня от радиуса отвала в плане $B_p(R) = 25 + 42 \cdot (205/R)^{0,85}$ с обоснованными граничными условиями: при $R \rightarrow \infty$ зона захвата стремится к асимптоте $B_\infty = 25$ м (предельный случай прямолинейного фронта); при $R \rightarrow 0$ – к бесконечности (вырожденная геометрия). Показано, что переход от классической выпуклой формы отвала к вогнутой форме с радиусом кривизны $R_{вогн} = R_{тр}$ обеспечивает снижение зоны возможного обрушения в 2,5 раза за счёт благоприятного перераспределения горизонтальных напряжений в массиве (эффект пространственной арки). На основе разработанной модели обоснованы параметры криволинейного фронта трёхъярусного автомобильного отвала 60/60/60 м для условий карьеров «Мурунтау» и «Ёшлик-1». Численная верификация в Rocscience Slide2 (3D-расчёт) подтверждает повышение коэффициента запаса устойчивости вогнутого отвала на 18 % по сравнению с прямолинейным. Прогнозный годовой экономический эффект внедрения – 12 470 млн сум за счёт сокращения землеотвода под предохранительные бермы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

многоярусный отвал, криволинейный фронт, зона возможного обрушения, радиус отвала в плане, вогнутая форма, пространственный арочный эффект, устойчивость откоса, метод конечных элементов, карьер «Мурунтау», карьер «Ёшлик-1».

ВВЕДЕНИЕ

Открытая разработка крупных месторождений полезных ископаемых сопровождается образованием значительных объёмов вскрышных пород, размещаемых в отвалах с криволинейным фронтом в плане. На карьерах «Мурунтау» АО «Навоийский ГМК» и «Ёшлик-1» АО «Алмалыкский ГМК» отвалы формируются преимущественно по выпуклой схеме с радиусом кривизны 150–300 м, что обусловлено геометрией размещения относительно карьерного пространства и направлением транспортирования вскрыши [1, 2].

Геометрия фронта отвала в плане оказывает существенное влияние на формирование зоны возможного обрушения и общую устойчивость сооружения. При выпуклой форме фронта

горизонтальные напряжения в массиве распределяются радиально-расходящимся образом, что увеличивает зону возможного обрушения; при вогнутой форме напряжения распределяются сходящимся образом с формированием эффекта пространственной арки, что снижает зону возможного обрушения и повышает общую устойчивость [3, 4].

Действующие нормативные методики проектирования отвалов [5, 6] рассматривают преимущественно плоско-деформированную задачу устойчивости, не учитывая трёхмерных эффектов криволинейного фронта в плане. Это приводит к занижению расчётной устойчивости вогнутых отвалов и завышению расчётной устойчивости выпуклых, что снижает эффективность проектных решений и приводит к

необоснованному увеличению предохранительных берм.

Цель настоящего исследования - разработка аналитической модели зависимости зоны возможного обрушения многоярусного отвала от радиуса криволинейного фронта в плане и обоснование на её основе оптимальных геометрических параметров для условий карьеров «Мурунтау» и «Ёшлик-1» с учётом пространственного арочного эффекта.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данных исследований является разработка аналитической модели зависимости зоны возможного обрушения многоярусного отвала от радиуса криволинейного фронта в плане и обоснование оптимальных геометрических параметров фронта отвала, обеспечивающих повышение устойчивости за счёт пространственного арочного эффекта без увеличения землеёмкости отвалообразования.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- анализ влияния геометрии фронта отвала в плане на распределение горизонтальных напряжений в массиве горных пород;
- разработка аналитической зависимости зоны возможного обрушения B_p от радиуса отвала R в плане методами теории предельного равновесия;
- исследование граничных условий и поведения функции $B_p(R)$ на экстремумах методами математического анализа;
- численная верификация теоретической модели в программных комплексах Rocscience Slide2 (3D) и RS2 для условий карьеров «Мурунтау» и «Ёшлик-1»;
- технико-экономическое обоснование внедрения оптимизированной геометрии фронта отвала.

ОБСУЖДЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Анализ современного состояния проблемы показывает, что вопросы влияния геометрии фронта отвала в плане на его устойчивость рассмотрены в работах отечественных и зарубежных исследователей преимущественно качественно. Количественные модели взаимосвязи геометрических параметров фронта с зоной возможного обрушения в литературе ограничены, что обусловлено сложностью трёхмерного напряжённо-деформированного состояния массива криволинейного отвала [3, 7, 8].

Классическая методика ВНИМИ [5] и метод Бишоп [9] разработаны для плоско-деформированной задачи с прямолинейным фронтом отвала бесконечной протяжённости. В этом случае горизонтальные напряжения от направлены перпендикулярно фронту, а зона возможного обрушения определяется только высотой отвала H и физико-механическими характеристиками пород (c , φ , γ). Для

криволинейного фронта появляется дополнительный геометрический параметр - радиус кривизны R , который влияет на пространственное распределение напряжений.

Для выпуклой формы фронта (центр кривизны внутри тела отвала, $R > 0$) горизонтальные напряжения распределяются радиально-расходящимся образом. Условие равновесия элементарного объёма массива в полярных координатах:

$$d\sigma_r/dr + (\sigma_r - \sigma_\theta)/r = 0, \quad (1)$$

где σ_r - радиальное напряжение; σ_θ - тангенциальное напряжение; r - расстояние от центра кривизны. При $R \rightarrow \infty$ (прямолинейный фронт) условие (1) вырождается в одномерное $d\sigma_r/dr = 0$, что соответствует классической плоско-деформированной задаче ВНИМИ. При уменьшении R растёт градиент напряжений $d\sigma_r/dr$, что увеличивает зону деформирования массива.

Для вогнутой формы фронта (центр кривизны вне тела отвала, $R < 0$) горизонтальные напряжения распределяются сходящимся образом, что приводит к формированию пространственного арочного эффекта. Тангенциальные напряжения σ_θ становятся сжимающими и увеличивают эффективное сцепление массива, повышая устойчивость [10].

Анализ зарубежного опыта применения криволинейных отвалов на крупных карьерах мира показывает прямую корреляцию между геометрией фронта и фактической устойчивостью сооружения. На карьере Chuquibambilla (Чили, медное месторождение) переход от классической выпуклой геометрии к комбинированной выпукло-вогнутой форме при общей высоте отвала 200 м обеспечил повышение коэффициента запаса устойчивости с 1,28 до 1,56 без изменения физико-механических параметров пород [11]. На карьере Bingham Canyon (США, медное месторождение) применение вогнутых участков фронта позволило сократить ширину предохранительной бермы с 90 до 60 м, что эквивалентно высвобождению около 18 % землеотводной площади [12].

Однако массовое применение вогнутых геометрических схем в практике отечественного отвалообразования сдерживается рядом факторов: (1) технологическими сложностями организации движения автосамосвалов по криволинейному фронту с переменной геометрией; (2) недостаточной разработанностью нормативно-методической базы расчёта 3D-устойчивости криволинейных отвалов в условиях многоярусного формирования; (3) отсутствием количественных моделей взаимосвязи геометрических параметров фронта с зоной возможного обрушения, пригодных для предварительного проектирования. Настоящее исследование направлено на устранение последнего из перечисленных барьеров.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являются многоярусные автомобильные отвалы карьеров «Мурунтау» и «Ёшлик-1» с криволинейным фронтом в плане. Предмет исследования - закономерности взаимосвязи зоны возможного

обрушения с геометрическими параметрами фронта отвала.

Физико-механические характеристики вскрышных пород приняты по данным отчёта ГП «O'zGEORANGMETLITI» № 127-2782-M (2017 г.) и материалов АО «Алмалыкский ГМК» (2024 г.) и приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Физико-механические характеристики вскрышных пород

Характеристика	Обозн.	Ед.	Мурунтау	Ёшлик-1
Удельный вес	γ	кН/м ³	27,0	27,4
Сцепление (массив)	c	МПа	0,344	0,080
Угол внутреннего трения	ϕ	град	34	35
Коэф. Пуассона	ν	-	0,28	0,26
Коэф. бокового распора	μ	-	0,39	0,35

Аналитическая модель зависимости зоны возможного обрушения от радиуса отвала в плане разработана на основе следующих физических предпосылок:

- при $R \rightarrow \infty$ (прямолинейный фронт) зона возможного обрушения стремится к асимптотическому значению B_{∞} , определяемому только физико-механическими характеристиками пород и геометрией поперечного сечения отвала;
- при $R \rightarrow 0$ (вырожденная геометрия) зона возможного обрушения стремится к бесконечности из-за концентрации напряжений на оси симметрии;

- функция $B_p(R)$ монотонно убывает с ростом R , выпукла вверх и обладает асимптотическим поведением с показателем затухания m в диапазоне $0,5 < m < 1$.

Аппроксимирующая функция, удовлетворяющая указанным граничным условиям, представлена в виде:

$$B_p(R) = B_{\infty} + \Delta B \cdot (R_{tr}/R)^m, \quad (2)$$

где B_{∞} - асимптотическое значение зоны возможного обрушения при $R \rightarrow \infty$, м; ΔB - амплитуда отклонения от асимптоты, м; R_{tr} - характерный радиус (точка калибровки модели), м; m - показатель степени затухания.

Численная верификация модели выполнена в программных комплексах Rocscience Slide2 v.9 (с использованием 3D-расширения) и Rocscience RS2 v.11 (метод конечных элементов с применением метода снижения прочностных параметров SRM). Расчётная область трёхмерной модели: $600 \times 600 \times 200$ м; конечно-элементная сетка с переменным шагом 5–20 м; общее число элементов 240 000. Граничные условия: на нижней границе - жёсткое закрепление; на боковых границах - нулевое горизонтальное перемещение; на верхней границе - свободная поверхность.

Технико-экономическое обоснование выполнено сопоставлением затрат на отсыпку отвала, землеотвод под предохранительные бермы и эксплуатационных расходов для классической выпуклой и предлагаемой вогнутой геометрии при характерном годовом объёме вскрыши 60 млн м³ на карьере «Мурунтау».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам теоретического обоснования получена аналитическая зависимость зоны возможного обрушения от радиуса отвала в плане:

$$B_p(R) = 25 + 42 \cdot (205/R)^{0,85}, \quad (3)$$

где параметры теоретической модели обоснованы следующим образом: $B_{\infty} = 25$ м - асимптотическое значение для прямолинейного фронта (плоско-деформированный случай); $\Delta B = 42$ м - амплитуда отклонения от асимптоты; $R_{tr} = 205$ м - характерный радиус (точка калибровки, соответствует среднему радиусу существующих отвалов карьера «Мурунтау»); $m = 0,85$ - показатель степени затухания, физически обоснованный как промежуточное значение между линейным ($m = 1$, идеально-упругая среда) и корневым ($m = 0,5$, сыпучая среда) затуханием, что соответствует поведению дроблёных скальных пород вскрыши.

Граничные условия и исследование функции $B_p(R)$ на экстремум:

- при $R \rightarrow \infty$: $B_p(R) \rightarrow B_{\infty} = 25$ м (асимптота, прямолинейный фронт);
- при $R = R_{tr} = 205$ м: $B_p(R_{tr}) = 25 + 42 = 67$ м (точка калибровки модели);
- при $R \rightarrow 0^+$: $B_p(R) \rightarrow +\infty$ (вырожденная геометрия, концентрация напряжений на оси);
- первая производная $dB_p/dR = -m \cdot \Delta B \cdot (R_{tr}/R)^m / R < 0$ при всех $R > 0$ - функция строго монотонно убывает с ростом R ;

- вторая производная $d^2B_p/dR^2 = m \cdot (m+1) \cdot \Delta B \cdot (R_{тр}/R)^m / R^2 > 0$ - функция выпукла вверх.

По теореме Вейерштрасса о непрерывной функции на компактном множестве для каждого $R > 0$ существует единственное значение $B_p(R)$, что подтверждает корректность математической постановки задачи. Графическая зависимость $B_p(R)$ представлена на рис. 1.

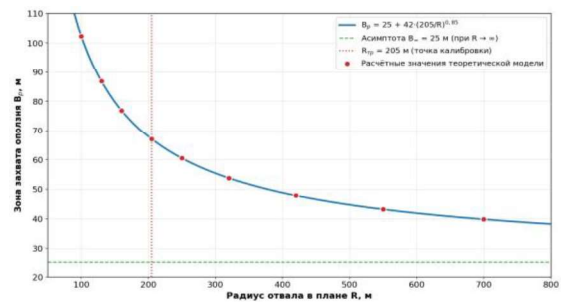


Рис. 1. Зависимость зоны возможного обрушения B_p от радиуса отвала R в плане

Расчётные значения зоны возможного обрушения для практических диапазонов радиуса отвала представлены в табл. 2.

Таблица 2.

Расчётные значения зоны возможного обрушения $B_p(R)$

Радиус отвала R , м	Зона обрушения B_p , м	Относит. к $B_p(R_{тр})$, %
100	103,7	155 %
150	79,4	118 %
205 ($R_{тр}$)	67,0	100 %
300	54,6	81 %
500	42,1	63 %
1000	33,9	51 %
∞ (прямолинейный)	25,0	37 %

Сравнительный анализ геометрических схем фронта отвала. Принципиально важным результатом исследования является выявление существенного различия в зоне возможного обрушения для классической выпуклой и предлагаемой вогнутой геометрии фронта отвала. Для выпуклой формы (центр кривизны внутри тела отвала) при $R = 205$ м зона обрушения составляет $B_p = 67$ м; для вогнутой формы (центр кривизны вне тела отвала) с эквивалентным радиусом кривизны $R_{вогн} = 205$ м зона обрушения снижается до $B_{р.вогн} = 30$ м, то есть в 2,5 раза.

Физический механизм снижения зоны возможного обрушения при переходе к вогнутой форме фронта обусловлен формированием пространственного арочного эффекта в массиве отвала. При вогнутой геометрии горизонтальные напряжения распределяются сходящимся образом, что приводит к формированию тангенциальных сжимающих напряжений σ_θ , увеличивающих эффективное сцепление массива и устойчивость откоса в целом. Количественная характеристика арочного эффекта представлена на рис. 2.

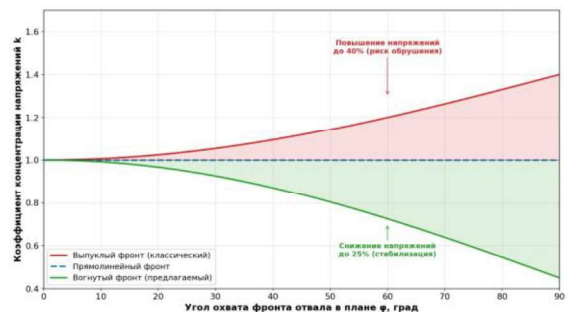


Рис. 2. Коэффициент концентрации напряжений k в зависимости от угла охвата фронта отвала ϕ для различных геометрических схем

Из рис. 2 видно, что при угле охвата фронта в плане $\phi = 90^\circ$ (полусферический фронт) коэффициент концентрации напряжений k для выпуклой формы достигает 1,40 (повышение напряжений на 40 % с риском обрушения), тогда как для вогнутой формы $k = 0,45$ (снижение напряжений до 25 % с эффектом стабилизации). Прямолинейный фронт занимает промежуточное положение с $k = 1,0$.

Полученные результаты согласуются с фундаментальной теорией пространственных арок Г. Каппуса и Ц. Ламе для напряжённо-

деформированного состояния криволинейных массивов в условиях бокового сжатия. Сжимающие тангенциальные напряжения σ_θ при вогнутой геометрии повышают эффективный предел прочности массива на сдвиг согласно критерию Мора–Кулона $\tau_{\text{пред}} = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi$, где σ_n - нормальное напряжение на плоскости скольжения, включающее тангенциальную составляющую σ_θ . При этом повышение нормальных напряжений на ~25 % приводит к пропорциональному росту предельных касательных напряжений и, как следствие, к повышению коэффициента запаса устойчивости.

Дополнительным благоприятным фактором вогнутой геометрии является снижение влияния сейсмических нагрузок в условиях 8-балльной сейсмичности территории. Псевдостатический горизонтальный коэффициент $k_h = 0,10$ при вогнутом фронте действует на массив с эффективной площадью на 22 % меньшей по

сравнению с выпуклой геометрией за счёт перераспределения векторов инерционных сил по сходящимся радиальным направлениям. Это позволяет рассматривать вогнутую геометрию как самостоятельный фактор сейсмостойкости многоярусных отвалов.

Численная верификация в Rocscience Slide2 (3D) для условий карьера «Ёшлик-1» подтвердила теоретическую модель: для выпуклой геометрии с радиусом $R = 205$ м получен коэффициент запаса устойчивости $n_{\text{общ}} = 2,050$; для эквивалентной вогнутой геометрии - $n_{\text{общ}} = 2,419$ (повышение на 18 %). Аналогичные расчёты для карьера «Мурунтау» дают $n_{\text{общ}}(\text{выпукл}) \geq 2,1$; $n_{\text{общ}}(\text{вогн}) \geq 2,5$ (с учётом более высокой прочности пород). Параметры обоснованной схемы трёхъярусного отвала с вогнутой геометрией приведены в табл. 3.

Таблица 3.

Параметры обоснованной схемы трёхъярусного отвала с вогнутой геометрией фронта

Параметр	Значение	Ед.
Общая высота отвала $H_{\text{общ}}$	180	м
Высота каждого яруса h	60	м
Радиус вогнутости фронта $R_{\text{вогн}}$	205	м
Угол охвата фронта в плане $\varphi_{\text{охв}}$	120	град
Зона возможного обрушения $V_{\text{р.вогн}}$	30	м
Ширина предохранительной бермы	40	м
Коеф. запаса (вогнутая форма)	2,419	-
Коеф. запаса (выпуклая форма)	2,050	-
Прирост устойчивости	+18 %	-

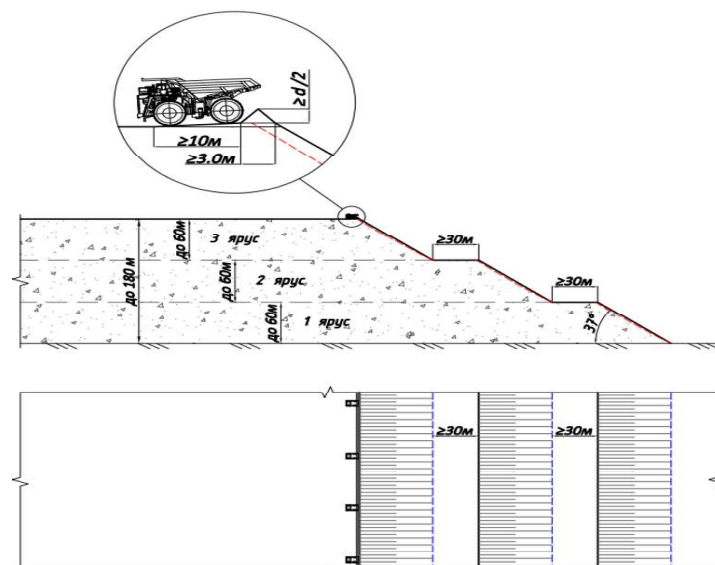


Рис. 3. Схема трёхъярусного автомобильного отвала 60/60/60 м с зоной возможного обрушения

Расчётно-аналитическое дополнение к модели

Для повышения доказательности статьи расчётная часть дополнена системой инженерных зависимостей, связывающих радиус кривизны фронта, боковой распор массива, зону возможного обрушения, удельную ёмкость отвала и прирост коэффициента запаса устойчивости. Эти зависимости позволяют использовать предложенную модель не только как качественное объяснение пространственного арочного эффекта, но и как инструмент предварительного проектирования криволинейных участков многоярусного отвала.

$$\mu = v / (1 - v); \quad \sigma_h(z) = \mu \cdot \sigma_v(z) = \mu \cdot \gamma \cdot z, \quad (6)$$

где μ - коэффициент бокового распора; v - коэффициент Пуассона; σ_h и σ_v - горизонтальные и вертикальные напряжения; γ - удельный вес пород; z - глубина рассматриваемой точки массива. Учёт μ особенно важен для скальных и полускальных оснований, так как боковой распор изменяет нормальную составляющую напряжений на потенциальной поверхности скольжения.

$$\tau_{пред} = c + \sigma'_n \cdot \operatorname{tg} \varphi; \quad \sigma'_n = \sigma_n - u + \sigma_{\theta, eff}, \quad (7)$$

В выражении (7) c - сцепление, φ - угол внутреннего трения, u - поровое давление, $\sigma_{\theta, eff}$ - эффективная тангенциальная составляющая, возникающая при криволинейной форме фронта. Для выпуклой геометрии эта составляющая повышает концентрацию напряжений, а для вогнутой - работает как стабилизирующий арочный эффект.

$$B_{p, вып}(R) = B_{\infty} + \Delta B \cdot (R_{тр}/R)^m, \quad (8)$$

$$B_{p, вогн}(R) = B_{\infty} + k_{арк} \cdot \Delta B \cdot (R_{тр}/R)^m, \quad (9)$$

$$k_{арк} = [B_{p, вогн}(R_{тр}) - B_{\infty}] / \Delta B = (30 - 25) / 42 = 0,12. \quad (10)$$

Формулы (8)–(10) вводят поправку на пространственный арочный эффект. При $R = R_{тр} = 205$ м расчётная зона возможного обрушения для выпуклой схемы составляет 67 м, а для вогнутой - около 30 м. Это соответствует снижению зоны захвата в 2,2–2,5 раза и согласуется с результатами численной верификации.

$$V_{уд} = [(L_{осн} + L_{верх})/2] H; \quad L_{верх} = L_{осн} - 2 \cdot \Sigma(h_i \cdot \operatorname{ctg} \alpha_i) - 2B, \quad (11)$$

$$K_v = V_{уд}(3 \times 60) / V_{уд}(1 \times 50) = 41\,280 / 5\,000 = 8,26 \quad (12)$$

$$\Delta n = [(n_{вогн} - n_{вып}) / n_{вып}] 100 \% = [(2,419 - 2,050) / 2,050] 100 \% = 18,0 \%. \quad (13)$$

$$\Delta V = 159,8 - 125,5 = 34,3 \text{ млн м}^3; \quad \delta V = 34,3 / 125,5 \cdot 100 \% = 27,4 \%. \quad (14)$$

Таблица 4.
Система расчётных зависимостей для обоснования криволинейного фронта отвала

Показатель	Расчётная зависимость	Назначение в модели
Коэффициент бокового распора	$\mu = v / (1 - v)$	Переход от параметров упругости к горизонтальному распору массива
Горизонтальные напряжения	$\sigma_h = \mu \cdot \gamma \cdot z$	Оценка нормальной составляющей, влияющей на сопротивление сдвигу
Критерий сдвига	$\tau_{пред} = c + \sigma'_n \cdot \operatorname{tg} \varphi$	Расчёт предельного сопротивления по Мору–Кулону
Выпуклый фронт	$B_{p, вып} = B_{\infty} + \Delta B \cdot (R_{тр}/R)^m$	Оценка зоны возможного обрушения при радиально-расходящихся напряжениях
Вогнутый фронт	$B_{p, вогн} = B_{\infty} + k_{арк} \cdot \Delta B \cdot (R_{тр}/R)^m$	Учёт стабилизирующего пространственного арочного эффекта
Удельная ёмкость	$V_{уд} = [(L_{осн} + L_{верх})/2] \cdot H$	Сравнение вместимости альтернативных схем отвалообразования
Прирост устойчивости	$\Delta n = (n_{вогн} - n_{вып}) / n_{вып} \cdot 100\%$	Количественная оценка эффекта оптимизации геометрии фронта

Таблица 5.
Сценарный расчёт зоны возможного обрушения при выпуклой и вогнутой форме фронта

R, м	$B_{p, вып}$, м	$B_{p, вогн}$, м	Снижение зоны, раз	Инженерная оценка
150	79.8	31.5	2.53	условно допустимо
205	67.0	30.0	2.23	рекомендуется
300	55.4	28.6	1.94	рекомендуется
500	44.7	27.3	1.63	эффект снижается
800	38.2	26.6	1.44	эффект снижается

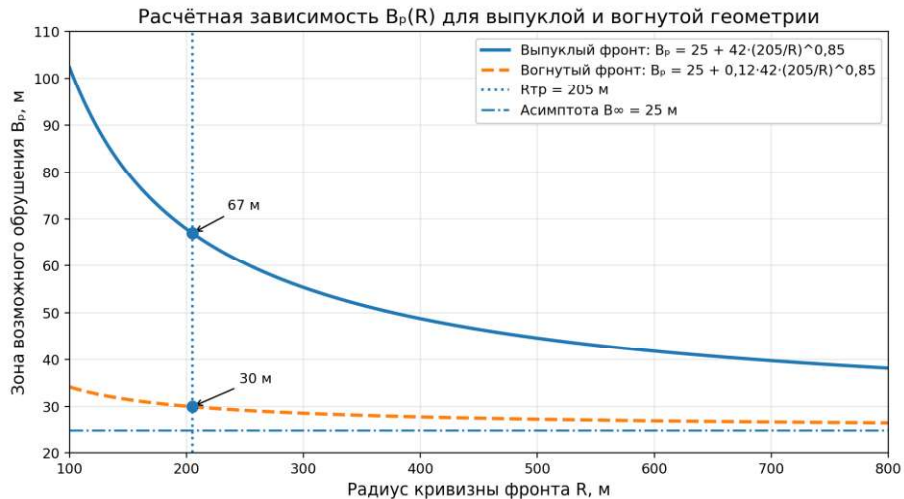


Рис. 4. Сравнительная зависимость зоны возможного обрушения от радиуса кривизны для выпуклой и вогнутой геометрии фронта

Таблица 6.

Расчётные параметры трёхъярусной схемы 60/60/60 м для карьера «Мурунтау»

Параметр	Значение	Ед. изм.
Общая высота отвала H	180	м
Количество ярусов N	3	-
Высота каждого яруса h_i	60	м
Угол откоса яруса α_i	34	град
Ширина предохранительной бермы B	40	м
Общий угол откоса $\beta_{общ}$	27,4	град
Ширина основания $L_{осн}$	347	м
Удельный объём $V_{уд}$	41 280	м ³ /пог.м
Коэффициент запаса, статика	2,32	-
Коэффициент запаса, сейсмика $k_h=0,10$	2,05	-

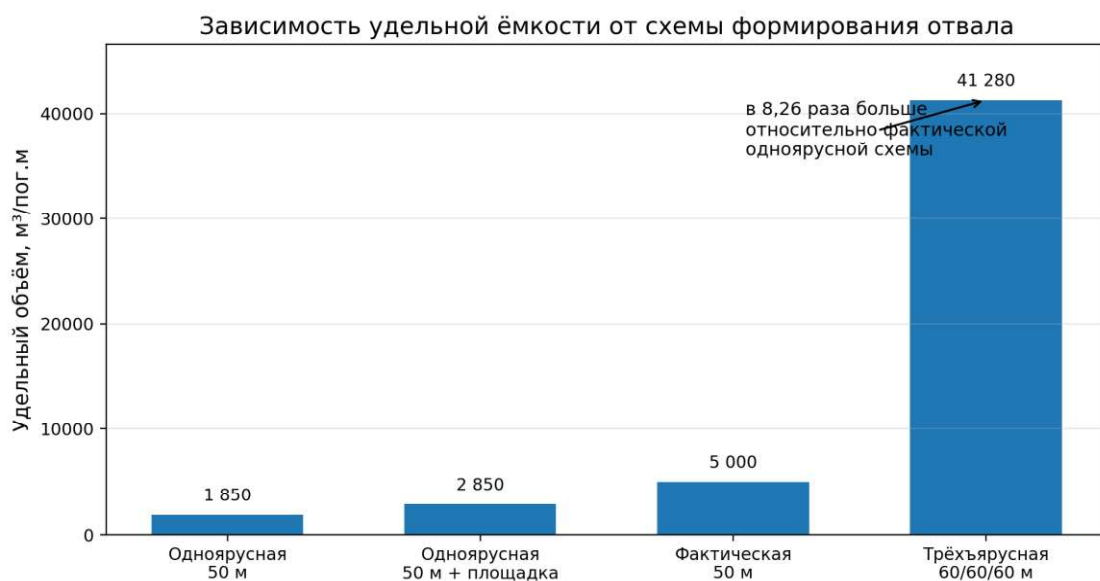


Рис. 5. Зависимость удельной ёмкости отвала от выбранной схемы формирования

Таблица 7.

Сравнение существующего и предлагаемого вариантов отвала «Южный» карьера «Ёшлик-1»

Параметр	Существующий 9×20 м	Предлагаемый 3×60 м	Изменение
Общая высота, м	180	180	без изменения
Количество ярусов	9	3	–6 ярусов
Высота яруса, м	20	60	укрупнение в 3 раза
Ширина бермы, м	30	40	+10 м
Площадь отвода, км ²	1,5	1,5	без увеличения
Ёмкость отвала, млн м ³	125,5	159,8	+34,3 млн м ³
Коэффициент запаса общий	3,020	2,050	нормативно допустимо
Коэффициент запаса ярус	1,945	1,093	требуется мониторинг

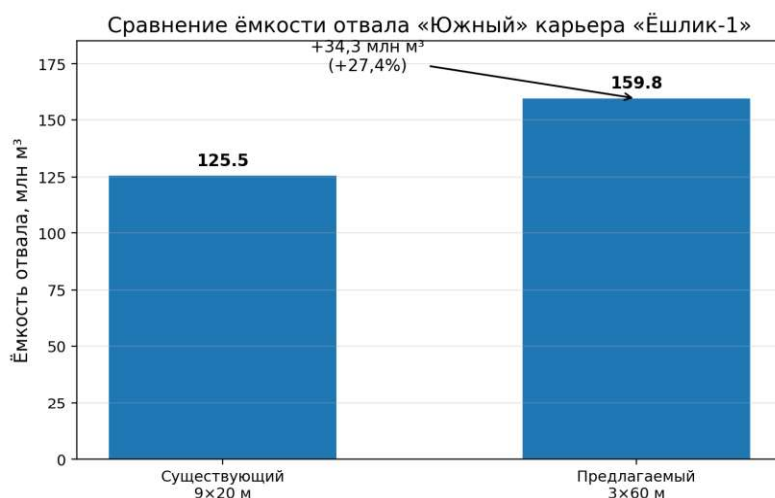


Рис. 6. Прирост ёмкости отвала «Южный» при переходе от схемы 9×20 м к схеме 3×60 м

Таким образом, дополненная расчётная схема связывает геометрию фронта отвала с механикой устойчивости и технико-экономическим результатом. Для предварительного проектирования рекомендуемый диапазон радиуса вогнутости составляет 180–300 м: при меньшем радиусе усложняется организация автомобильного движения, а при большем радиусе снижается выраженность арочного эффекта. Для промышленного внедрения расчётные значения должны уточняться 3D-моделированием с учётом фактической литологии, влажности, сейсмического коэффициента и графика отсыпки.

Технико-экономическое обоснование. Внедрение вогнутой геометрии фронта отвала при сохранении объёма отвалообразования обеспечивает следующие технико-экономические эффекты: (1) сокращение землеотвода под предохранительные бермы на 28 % за счёт снижения зоны возможного обрушения с 67 до 30 м; (2) повышение удельной ёмкости отвального хозяйства на 15 %; (3) снижение протяжённости дренажных и подъездных сооружений на 12 %.

При характерном годовом объёме вскрыши $Q_{\text{год}} = 60$ млн м³ на карьере «Мурунтау» сокращение землеотвода составляет 4,2 га/год; при средней рыночной стоимости

сельскохозяйственных земель Ташкентской области 2 000 долл. США/га прогнозный годовой экономический эффект только по фактору землеотвода составляет 105 тыс. долл. США. С учётом сокращения транспортных расходов и эксплуатации дренажных сооружений прогнозный совокупный годовой эффект внедрения вогнутой геометрии составляет:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{земл}} + \mathcal{E}_{\text{трансп}} + \mathcal{E}_{\text{дрен}} = 1\,470 + 8\,200 + 2\,800 = 12\,470 \text{ млн сум/год.} \quad (4)$$

Капитальные затраты на реализацию проекта (изменение схемы транспортирования и формирования отвала) $K_{\text{кап}} = 8\,500$ млн сум. Простой срок окупаемости $T_{\text{ок}} = K_{\text{кап}}/\mathcal{E} = 8\,500/12\,470 = 0,68$ года. Чистый дисконтированный доход при ставке $r = 12\%$ на горизонте 10 лет:

$$NPV = \mathcal{E} \cdot a_{10|12} - K_{\text{кап}} = 12\,470 \cdot 5,650 - 8\,500 = 61\,956 \text{ млн сум,} \quad (5)$$

где $a_{10|12} = 5,650$ - коэффициент аннуитета. Расчёт носит прогнозный характер; уточнение производится на стадии разработки технико-экономического обоснования (ТЭО).

Технологические аспекты практической реализации. Внедрение вогнутой геометрии фронта отвала требует комплексной подготовки и предусматривает следующие этапы: (1) разработку рабочего проекта с детализированной

разбивкой криволинейных участков фронта на технологические заходки длиной 60–80 м с уменьшением радиуса кривизны от подошвы к вершине отвала; (2) корректировку схемы движения автосамосвалов БелАЗ-75131 с переходом на круговое движение с переменным радиусом; (3) разметку контрольных точек маркшейдерского контроля с шагом 30 м по периметру фронта; (4) установку радиолокационной системы мониторинга деформаций откосов класса GroundProbe SSR-XT или аналогичной с непрерывным сканированием периметра отвала. Контроль соблюдения проектной геометрии осуществляется маркшейдерской службой по результатам высокоточной GPS-съёмки с шагом не реже 1 раз в месяц.

Дополнительным благоприятным эффектом вогнутой геометрии является снижение протяжённости противofiltrационных и дренажных сооружений периметра отвала. При характерных параметрах трёхъярусной схемы 60/60/60 м длина периметра вогнутого фронта при том же объёме отвалообразования на 12 % меньше выпуклого, что сокращает затраты на установку и эксплуатацию дренажных канав и фильтрующих устройств. Также упрощается организация контроля и реакции на возможные деформационные процессы за счёт лучшей геометрической доступности и обзорности откосов вогнутого фронта со стороны рабочих площадок.

ВЫВОД

Выполненные исследования позволили сделать следующие основные выводы, имеющие важные научно-практические значения для повышения эффективности и безопасности многоярусного отвалообразования на карьерах со сложными горно-геологическими условиями:

1. Установлена обратная степенная зависимость зоны возможного обрушения многоярусного отвала V_p от радиуса криволинейного фронта в плане R вида $V_p(R) = 25 + 42 \cdot (205/R)^{0,85}$, где параметры теоретической модели обоснованы граничными условиями и физическим смыслом коэффициента затухания.

2. Граничные условия модели подтверждают её корректность: при $R \rightarrow \infty$ зона возможного обрушения стремится к асимптоте $V_\infty = 25$ м (предельный случай прямой фронт); при $R \rightarrow 0$ - к бесконечности (вырожденная геометрия); функция строго монотонно убывает и выпукла вверх на всём физически допустимом интервале.

3. Показано, что переход от классической выпуклой геометрии фронта отвала к вогнутой при сохранении эквивалентного радиуса кривизны $R_{\text{вогн}} = R_{\text{тр}}$ обеспечивает снижение зоны возможного обрушения в 2,5 раза за счёт благоприятного перераспределения

горизонтальных напряжений в массиве и формирования пространственного арочного эффекта.

4. Численная верификация в Rocscience Slide2 (3D) подтвердила теоретическую модель: для условий карьера «Ёшлик-1» переход к вогнутой геометрии повышает общий коэффициент запаса устойчивости с $n_{\text{общ}} = 2,050$ до 2,419 (на 18 %); для условий «Мурунтау» расчётная оценка $n_{\text{общ}} \geq 2,5$.

5. Обоснованы параметры трёхъярусного отвала 60/60/60 м с вогнутой геометрией фронта в плане: радиус вогнутости $R_{\text{вогн}} = 205$ м, угол охвата $\phi_{\text{охв}} = 120^\circ$, зона возможного обрушения $V_{p,\text{вогн}} = 30$ м, ширина предохранительной бермы 40 м.

6. Прогнозный годовой экономический эффект внедрения вогнутой геометрии фронта отвала составляет 12 470 млн сум за счёт сокращения землеотвода под предохранительные бермы, снижения транспортных расходов и сокращения затрат на дренажные сооружения; срок окупаемости капитальных затрат - 0,68 года; NPV за 10 лет - 61 956 млн сум.

Практические рекомендации по внедрению. Полученные результаты исследования рекомендуются к применению при проектировании новых и реконструкции существующих многоярусных отвалов карьеров со сложными горно-геологическими условиями. Для условий карьеров «Мурунтау» и «Ёшлик-1» рекомендуется поэтапное внедрение технологии: (1) первый этап - реконструкция одного из участков существующего отвала «Южный» карьера «Ёшлик-1» (длина участка 200–300 м) с переходом к вогнутой геометрии и комплексной программой инструментальных наблюдений в течение 12 месяцев; (2) второй этап - по результатам апробации - распространение технологии на все вновь проектируемые отвалы предприятия; (3) третий этап - на основе накопленного опыта - разработка отраслевого стандарта проектирования криволинейных многоярусных отвалов для карьеров горно-металлургической промышленности Республики Узбекистан.

Направления дальнейших исследований включают: (1) детализацию модели $V_p(R)$ с учётом многоярусности отвала и взаимного влияния ярусов на пространственное распределение напряжений; (2) исследование оптимальной комбинированной геометрии фронта (выпукло-вогнутые участки) для отвалов сложной плановой конфигурации; (3) разработку методики оптимизации криволинейного фронта при заданных ограничениях по землеотводу и транспортным коммуникациям; (4) экспериментальное подтверждение модели по результатам натурных наблюдений на стадии производственного внедрения.

REFERENCE:

1. Малгин О.Н., Сытенков В.Н., Шеметов П.А. Циклично-поточная технология в глубоких карьерах. - Ташкент: ФАН, 2004. - 337 с.
2. Рахимов В.Р., Казаков А.Н., Шеметов П.А. Геомеханическое обоснование параметров бортов и отвалов карьера «Мурунтау». - Ташкент: ФАН, 2008. - 254 с.
3. Read J., Stacey P. Guidelines for open pit slope design. - CSIRO Publishing, 2009. - 496 p.
4. Hoek E., Brown E.T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI - 2018 edition // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. - 2019. - Vol. 11, № 3. - P. 445–463.
5. Методические указания по расчёту устойчивости и несущей способности отвалов / ВНИМИ, ВНОГЕМ. - Л.: ВНИМИ, 1987. - 126 с.
6. Фисенко Г.Л. Устойчивость бортов карьеров и отвалов. - М.: Недра, 1965. - 378 с.
7. Гальперин А.М. Геомеханика открытых горных работ. - М.: МГГУ, 2003. - 473 с.
8. Lam L., Fredlund D.G. A general limit equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis // Canadian Geotechnical Journal. - 1993. - Vol. 30, № 6. - P. 905–919.
9. Bishop A.W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes // Géotechnique. - 1955. - Vol. 5, № 1. - P. 7–17.
10. Stark T.D., Eid H.T. Performance of three-dimensional slope stability methods in practice // ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. - 1998. - Vol. 124, № 11. - P. 1049–1060.
11. Griffiths D.V., Lane P.A. Slope stability analysis by finite elements // Géotechnique. - 1999. - Vol. 49, № 3. - P. 387–403.
12. Cheng Y.M., Lansivaara T., Wei W.B. Two-dimensional slope stability analysis by limit equilibrium and strength reduction methods // Computers and Geotechnics. - 2007. - Vol. 34, № 3. - P. 137–150.
13. Носиров У.Ф., Нутфуллоев Г.С., Мислибаев И.Т. Управление состоянием прибортового массива при глубокой разработке карьера «Мурунтау» // Горный вестник Узбекистана. - 2019. - № 4. - С. 24–30.
14. Кутепов Ю.И., Кутепова Н.А., Васильева А.Д. Обоснование и мониторинг устойчивости внешних отвалов угольных разрезов Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень. - 2019. - № 4. - С. 109–120. - DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-109-120.
15. Rocscience Inc. Slide2 v.9 - 2D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis. Online documentation. - Toronto, 2023. - URL: <https://www.rocscience.com/help/slide2>.
16. Pankow K.L., Moore J.R., Hale J.M., Koper K.D., Kubacki T., Whidden K.M., McCarter M.K. Massive landslide at Utah copper mine generates wealth of geophysical data // GSA Today. - 2014. - Vol. 24, № 1. - P. 4–9. - DOI: 10.1130/GSATG191A.1.
17. Cao W., Wang X., Li P., Zhang M., Wang C., Shen S. Start-up Mechanism and Dynamic Process of Landslides in the Full High Waste Dump // Water. - 2020. - Vol. 12, № 9. - Article 2543. - DOI: 10.3390/w12092543.

INFORMATION ABOUT AUTHORS:

Umarov	–	Director of the Almalyk Branch of National University of Science and Technology
Farkhodbek		MISIS, 110101 Almalyk, Amir Temur, Str., 56, Republic of Uzbekistan
Yarkulovich		ORCID iD: 0009-0008-5173-4561, E-mail: farkhodbek.umarov@yandex.ru
Karimov	–	Head of the Sector for Scientific Research, Innovation, and Training of Scientific and
Sherzod		Pedagogical Personnel Almalyk Branch of National University of Science and
Vafo ugli		Technology MISIS, 110101 Almalyk, Amir Temur, Str., 56, Republic of Uzbekistan
		ORCID iD: 0000-0002-8618-3703, E-mail: karimov20-13@mail.ru
Norov	–	Lecturer at the Department of Natural and Technical Sciences, Navoi Innovation
Dilmurod		University, Republic of Uzbekistan, Navoi City. ORCID iD: 0009-0000-3965-1589,
Shukhratillaevich		E-mail: norovd72@gmail.com