

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ СООРУЖАЕМОГО В УЩЕЛЬЕ МНОГОЯРУСНОГО ОТВАЛА

Л.А. Манукян

*ЗАО "Лернаметаллургияи институт"*

Технологические решения сооружения многоярусных отвалов на равнинах и в сложных рельефных условиях значительно отличаются друг от друга. Однако в методических указаниях по расчету устойчивости отвалов разработан единый подход при установлении распределения удерживающих и сдвигающих сил, возникающих в теле отвала. Исследование процесса сооружения многоярусного отвала в ущелье на объемных моделях из эквивалентных материалов показало, что начиная с определенной высоты на осевой плоскости отвала возникают силы распора. Включение последних в расчетные модели определения устойчивости сооружаемых в ущельях отвалов позволит повысить точность определения рациональных и безопасных объемов складированных вскрышных пород. Решена трехмерная задача установления соотношения сил между призмами активного давления и упора с учетом дополнительного воздействия сил реакций со стороны боковых поверхностей ущелья, возникающих в процессе сооружения отвала на наклонном основании в ущелье.

**Ключевые слова:** ущелье, многоярусный отвал, склон, двугранный угол, силы распора, осевая плоскость, устойчивость.

**Введение.** Многолетняя практика эксплуатации отвалов, сооруженных в нагорных условиях, показывает, что в зависимости от горнотехнических и рельефных условий подотвальной территории и характеристик вскрышных пород определение основных параметров отвалов требует конкретного и обоснованного подхода. Многочисленными аналитическими и графоаналитическими исследованиями по разработке параметров отвала и оценке его устойчивости с учетом влияния разных технологических и природных факторов установлено, что полученные разными методами результаты расчетов значительно отличаются друг от друга. Кроме того, в настоящее время нет единого мнения по обоснованию устойчивости, расчету параметров и характеру распределения сил напряжения в многоярусных отвалах нагорных карьеров.

Проведением объемного физического моделирования для исследования напряженного состояния сооружаемого в ущелье многоярусного отвала было показано, что начиная с определенной высоты отвала и в зависимости от величины двугранного угла, образованного боковыми поверхностями ущелья, на осевой плоскости отвала возникают силы распора (зажима) [1]. Здесь показано также, что в известных методических указаниях по расчету параметров отвалов эти силы не учитываются, что приводит к необоснованности установления коэффициента запаса устойчивости сооружаемого в ущелье многоярусного отвала.

**Методы исследования.** В настоящее время известен ряд исследований, в которых рассмотрены вопросы, связанные с решением трехмерных задач по устойчивости откосов в трещиноватых скальных породах [2- 8].

Авторы исследования [8] пришли к выводу, что система диагональных и поперечных трещин на откосах карьеров приводит к деформации уступов и образованию породной массы клинообразной формы, что обычно не прогнозируется при установлении параметров уступов. На основании этого в [7] путем решения объемной задачи предложен расчетный метод определения параметров уступов, где уравнение предельного равновесия призмы обрушения представляет собой равенство между сдвигающими и удерживающими силами, действующими в двух боковых поверхностях сползания клинообразной породной призмы. Далее путем раздельного определения всех сил, входящих в выражение предельного равновесия обрушаемого массива, и его решения относительно угла откоса авторы устанавливают рациональные параметры уступа карьера.

В [7] рассмотрены также вопросы прогнозирования деформаций и выявления потенциально неустойчивых участков горных пород на бортах и уступах карьера, разрезанных секущими трещинами разного направления с последующим обрушением горной массы по желобообразной поверхности скольжения, и предложена система уравнений, характеризующая предельное равновесие скального клина на площадях его опорных плоскостей.

Характерным недостатком анализированных работ [7, 8] является то, что рассмотренная авторами деформируемая среда принята как монолитный массив горных пород, где все действующие на него силы обусловлены лишь собственным весом скального клина.

Определенный интерес представляет способ сооружения отвала, при котором придание фронту отвала выпуклой формы создает необходимый подпор в его боковых частях, что приводит к повышению его устойчивости за счет появления эффекта заклинивания в каньоне [6]. Однако в этой работе не проводятся определение и анализ напряженного состояния массива горных

пород сооружаемого отвала, не выявляется характер возникновения и не дается оценка влияния боковых сил на его устойчивость.

Решение объемной задачи устойчивости уступа, подрезанного различными ориентированными в пространстве поверхностями ослабления с образованием породного клина, приведено в исследованиях [3, 9], где авторами рассматривается возможное сдвижение треугольной пирамиды (клина) по поверхности, имеющей форму несимметричного желоба, образованного из сочетаний двух плоскостей. Путем проектирования удерживающих и сдвигающих сил поочередно на поверхности скольжения с учетом сил сцепления определяется устойчивость уступа. Задача решается при трех вариантах величины образованного двугранного угла между поверхностями ослабления.

Проведенный анализ указанных выше работ показал, что в них решается однотипная объемная задача, преследующая цель расчета устойчивости откосов уступов, ослабленных кососекущими поверхностями трещин. В предложенные исследователями аналитические выражения расчета устойчивости сооружения включены спроектированные на поверхность скольжения удерживающие, сдвигающие силы и силы сцепления, возникающие только благодаря массе породного клина, подрезанного в массиве горных пород трещинами или другими поверхностями ослабления.

Необходимо отметить, что с учетом некоторого геометрического подобия конфигураций клинообразного жесткого тела и ущелья и в связи с отсутствием в анализированных выше методах расчета устойчивого состояния клина от воздействия боковых сил данные расчетные методы, по нашему мнению, неприемлемы для установления рациональных параметров и оценки устойчивости сооружаемого в ущелье многоярусного отвального массива.

При решении некоторых практических задач по определению давления сыпучих и связных грунтов [10], а также установлению динамического давления грунтов на подпорные стенки определяются активное и пассивное давления грунта соответственно на стенку и внутреннюю часть грунтовой массы, противоположной смещению подпорной стенки. Отмечая практическую полезность, необходимо добавить, что фактически в вышеуказанной работе решаются плоские задачи по установлению равнодействующих внутренних сил и места их приложения на подпорной стенке.

Из многочисленных анализированных работ по оценке устойчивости массива отвалов на наклонном основании, где сползающий массив разделяется на призму активного и пассивного давлений с последующим рассмотрением взаимодействия этих призм, в постановке решаемой в данной статье задачи представляет интерес исследование [11]. В ней авторами установлены силы и

направления реакций между отсеками активного давления и упора отвала, сооруженного на наклонном основании, и на этой основе в общем виде предложено расчетное выражение условия предельного равновесия массы горных пород, сползающей по наклонному основанию. На основании модельных исследований на плоском поворотном стенде авторами определены также коэффициенты запаса устойчивости обрушаемого откоса из эквивалентных материалов при различных значениях угла отклонения реакций между отсеками выделенных призм. При этом по известной методике определяется соотношение удерживающих и сдвигающих сил, возникающих в массиве отвала на наклонном основании.

Отмечая научную и практическую значимость анализируемой выше работы, следует указать, что основные методические положения по расчету сил, действующих в массиве отвальных пород, отсыпанных на наклонном основании, нельзя использовать для определения параметров сооружаемого в ущелье многоярусного отвала. Это связано с тем, что предложенная расчетная методика базируется на результатах, полученных при решении плоской задачи, и не учитывает реальное влияние боковых сил распора, направленных от боковых поверхностей на породную массу в осевой плоскости сформированного в ущелье отвала.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Нами предлагается метод решения объемной задачи, где учитываются выявленные объемным физическим моделированием боковые сдвигающие и удерживающие силы, возникающие при сооружении отвалов в ущельях [1]. Результаты решения поставленной задачи позволяют:

- повысить точность определения параметров многоярусных одно- и двукрылых отвалов в ущельях;
- определить реальные и безопасные объемы складированных вскрышных пород в зависимости от фактических горнотехнических условий и характеристик места сооружения отвалов в ущельях.

За основу решения данной задачи принято известное соотношение сил в зонах активного давления и упора при отвалообразовании на наклонном основании [11] с учетом предложенного в данной статье дополнительного воздействия боковых сил, возникающих в процессе отвалообразования в ущельях.

С учетом вышеизложенного оценку устойчивости массива отвала в ущелье предлагается выполнить согласно разработанной схеме распределения сдвигающих и удерживающих сил, приведенной на рис. 1.

Порядок определения нормальных сил ( $dN_3$ ) и сил трения ( $dT_3$ ) на элементарной площадке боковой поверхности АДО, показанных на расчетной

модели ущелья, приведенной на рис.2а и б, заключается в следующем. Определяется величина вертикального давления массы отвальных пород ( $\sigma_z$ ) из выражения

$$\sigma_z = \gamma z, \quad (1)$$

где  $z$  – вертикальная координата точки, взятой на элементарной площадке;  $\gamma$  – плотность грунта,  $H/M^3$ ;  $\sigma_z$  – вертикальное давление нормальной составляющей на глубине  $z$ .

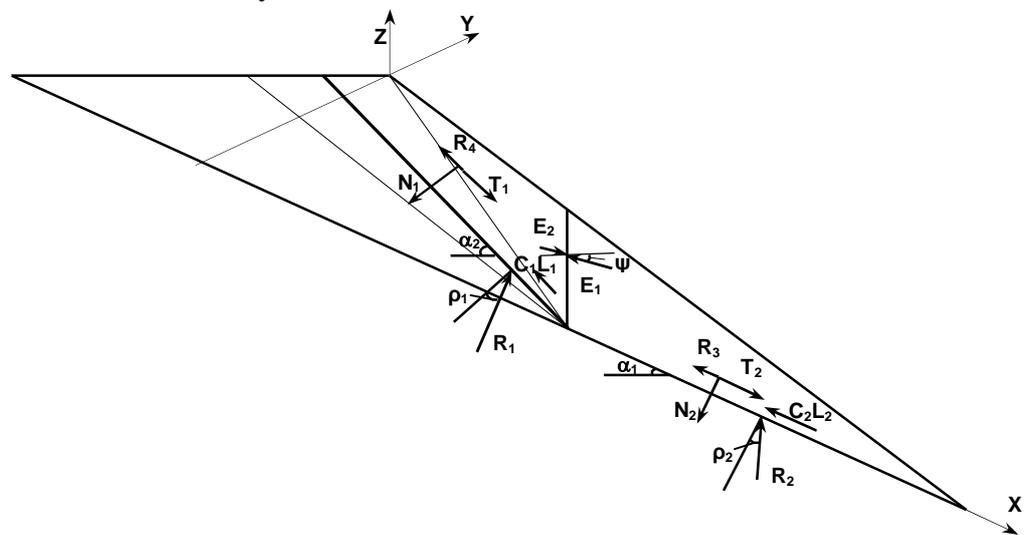
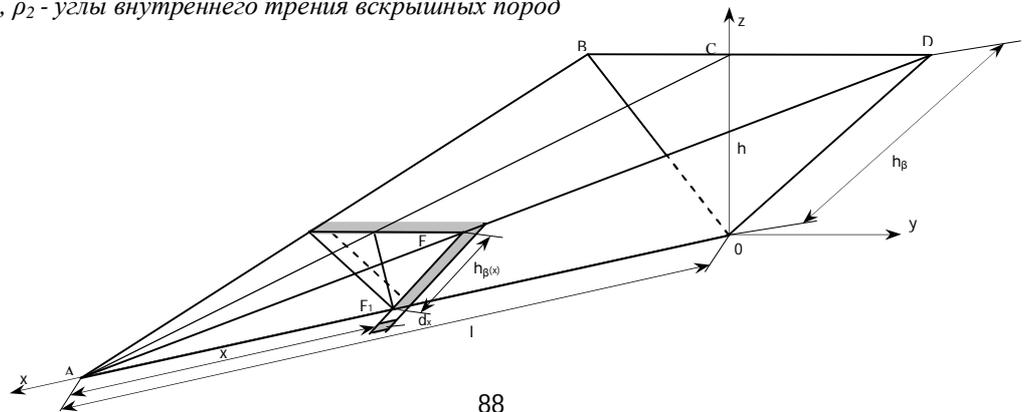


Рис. 1. Распределение сдвигающих и удерживающих сил, возникающих в зонах активного давления и упора на наклонном основании в ущельях;  $N_1, T_1, N_2, T_2$  - нормальные и касательные составляющие силы масс отсеков  $P_1, P_2$ ;  $C_1L_1, C_2L_2$  - силы сцепления;  $R_1, R_2$  - реактивные силы;  $R_3, R_4$  – силы, направленные против сдвижения горной массы;  $\psi$  - угол наклона реакции  $E$  к горизонту;  $\alpha_1, \alpha_2$  - направления сдвижения горной массы;  $\rho_1, \rho_2$  - углы внутреннего трения вскрышных пород



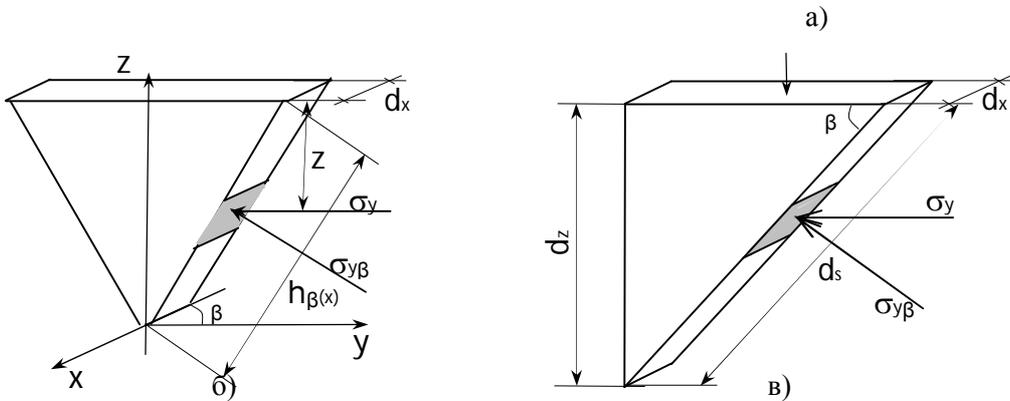


Рис. 2. Расчетная модель (а) распределения сил на элементарной площадке боковой поверхности ущелья (б и в)

Величина горизонтальной составляющей напряжения ( $\sigma_y$ ) на элементарной площадке на глубине  $z$  определяется из выражения

$$\sigma_y = \xi \sigma_z, \quad (2)$$

где  $\xi$  - коэффициент бокового давления,  $\xi = \frac{\mu}{1 - \mu}$ ;  $\mu$  - коэффициент Пуассона.

Величина нормальной составляющей ( $\sigma_{y\beta}$ ) бокового давления грунта на элементарной площадке определяется из выражения

$$\sigma_{y\beta} = \sigma_y \cos \beta = \sigma_z \xi \cos \beta = \gamma z \xi \cos \beta, \quad (3)$$

где  $\beta$  - угол откоса боковой поверхности к горизонту, град.

Из рис. 2 в следует

$$\sin \beta = \frac{d_z}{d_s}.$$

В этой связи уравнение (3) можно записать в виде

$$dN_3 = \sigma_{y\beta} d_x d_s.$$

Нормальные силы определяются из выражения

$$dN_3 = \gamma \xi \cos \beta \left( z \frac{d_z}{\sin \beta} \right) = \gamma \xi \operatorname{ctg} \beta z d_z dx. \quad (4)$$

$$dN_3 = \gamma \xi \operatorname{ctg} \beta z d_z dx.$$

Из подобия треугольников ADO и AFF<sub>1</sub> на рис. 2 а следует

$$\frac{h_\beta}{h_{\beta(x)}} = \frac{l}{x}, \quad \text{откуда} \quad h_{\beta(x)} = h_\beta \left( \frac{x}{l} \right).$$

Интегрируя выражение (4), получим

$$\begin{aligned}
N_3 &= \gamma \xi \operatorname{ctg} \beta \int_0^x \int_0^{h_\beta(x)} h z dz = \gamma \xi \operatorname{ctg} \beta \frac{z^2}{2} \Big|_0^{h_\beta(x)} dx, \\
N_{3(x)} &= \gamma \xi \operatorname{ctg} \beta \frac{h^2}{2} dx = \gamma \xi \operatorname{ctg} \beta \frac{1}{2} \int_0^l h_\beta^2 \left( \frac{x^2}{l^2} \right) dx, \\
N_3(l) \Big|_{x=l} &= \gamma \xi \operatorname{ctg} \beta \frac{1}{2} h_\beta^2 \frac{x^3}{3l^2} \Big|_0^l = \frac{1}{6} \gamma \xi \operatorname{ctg} \beta h_\beta^2 \cdot l,
\end{aligned} \tag{5}$$

Подставляя определенное из  $\Delta$ СОД выражение  $h_\beta = \frac{h}{\sin \beta}$  в уравнение (5), получим

$$N_3(l) = \frac{1}{6} \gamma \xi \operatorname{ctg} \beta \frac{h^2}{\sin^2 \beta} \cdot l, \tag{6}$$

где  $h$  – наибольшая высота отсыпанных отвальных пород на боковой поверхности,  $m$ .

Силы трения на боковой поверхности определяются из выражения

$$T_3(l) = N_3(l) \cdot \operatorname{tg} \rho_1 + C_3 L_3, \tag{7}$$

или

$$T_3(l) = \frac{1}{6} \gamma \xi \operatorname{ctg} \beta \frac{h^2}{\sin^2 \beta} \cdot l \cdot \operatorname{tg} \rho_1 + C_3 L_3.$$

Проецируя полученные нормальные силы и силы трения со стороны одной боковой поверхности ущелья на осевую плоскость АОС, получим

$$R_3 = N_3 \sin \Theta + T_3 \cos \Theta, \tag{8}$$

где  $\Theta$  – угол, образованный боковой и осевой поверхностями,  $град$ .

Проекция на осевую плоскость реактивных сил, равных геометрической сумме сил трения и нормальных сил со стороны другой боковой поверхности ущелья ( $R_4$ ) при том же угле ( $\Theta$ ) между боковой и осевой поверхностями, равна

$$R_4 = N_4 \sin \Theta + T_4 \cos \Theta. \tag{9}$$

Условие равновесия сдвигающих и удерживающих сил, воздействующих на призмы активного и пассивного давлений, т.е. силы реакций между отсеками  $E_1$  и  $E_2$  в условиях формирования отвала в ущелье и с учетом воздействия боковых реактивных сил, имеет вид

$$\Delta E = (E_2 - 2R_4) - (E_1 + 2R_3). \tag{10}$$

Из данного выражения следует, что силы реакции призмы активного давления уменьшаются, а силы реакции призмы упора, наоборот, увеличиваются.

В работе [11] рассмотрено условие предельного равновесия призм активного давления и призмы упора сползающей на наклонном основании горной массы. На основании поочередного проектирования известных по величине и направлению сил (сила массы отсеков  $P_1$  и  $P_2$ , силы сцепления  $C_1$  и  $C_2$ , реактивные силы  $R_1$  и  $R_2$ ) на направления сдвижения горной массы, принимая условия равенства реакций  $E_1 = E_2$  между отсеками призм в момент предельного равновесия, авторами получено выражение

$$\frac{T_1 - N_1 \operatorname{tg} \rho_1 - C_1 L_1}{\cos(\alpha_1 - \psi) + \sin(\alpha_1 - \psi) \operatorname{tg} \rho_1} = \frac{N_2 \operatorname{tg} \rho_2 + C_2 L_2 - T_2}{\cos(\psi - \alpha_2) - \sin(\psi - \alpha_2) \operatorname{tg} \rho_2}. \quad (11)$$

С учетом полученной нами зависимости (10) между реакциями отсеков сдвигающихся призм при отвалообразовании в ущельях выражение (11) можно записать в следующем виде:

$$\frac{N_2 \operatorname{tg} \rho_2 + C_2 L_2 - T_2}{\cos(\psi - \alpha_2) - \sin(\psi - \alpha_2) \operatorname{tg} \rho_2} - 2R_4 = \frac{T_1 - N_1 \operatorname{tg} \rho_1 - C_1 L_1}{\cos(\alpha_1 - \psi) + \sin(\alpha_1 - \psi) \operatorname{tg} \rho_1} + 2R_3. \quad (12)$$

Учитывая, что при расчетах параметры отвала определяют соответствующими предельному равновесию, но с показателями прочности горной массы (угол внутреннего трения  $\rho$  и сцепление  $c$ ), уменьшенными на величину коэффициента запаса, т.е. в  $n$  раз [12], общее уравнение предельного равновесия отвалов, сооруженных в ущельях, предлагается представить в виде

$$\frac{T_1 - N_1 \frac{\operatorname{tg} \rho_1}{n} - \frac{C_1}{n} L_1}{\cos(\alpha_1 - \psi) + (\alpha_1 - \psi) \frac{\operatorname{tg} \rho_1}{n}} - \frac{T_2 - N_2 \frac{\operatorname{tg} \rho_2}{n} - \frac{C_2}{n} L_2}{\cos(\psi - \alpha_2) - \sin(\psi - \alpha_2) \frac{\operatorname{tg} \rho_2}{n}} + 2(R_3 + R_4) = 0, \quad (13)$$

или

$$\frac{T_1 n - N_1 \operatorname{tg} \rho_1 - C_1 L_1}{\cos(\alpha_1 - \psi) \cdot n + \sin(\alpha_1 - \psi) \operatorname{tg} \rho_1} - \frac{N_2 \operatorname{tg} \rho_2 + C_2 L_2 - T_2 n}{\cos(\psi - \alpha_2) \cdot n + \sin(\psi - \alpha_2) \operatorname{tg} \rho_2} + 2(R_3 + R_4) = 0. \quad (14)$$

Коэффициент запаса устойчивости многоярусного отвала должен быть не менее 1,3, в противном случае - изменяются основные параметры отвала с целью получения необходимой величины  $n$ .

### **Выводы**

1. В настоящее время известно много исследований по определению параметров нагорных отвалов, однако нет единого мнения относительно их точности и применения в сложных рельефных условиях отвалообразования.

2. В известных методических указаниях по расчету параметров отвалов силы распора (зажима) не учитываются, что приводит к необоснованности установления коэффициента запаса устойчивости многоярусного отвала.

3. При известном соотношении сил в призмах активного давления и упора в отвале вскрышных пород решена объемная задача установления дополнительного воздействия боковых реактивных сил распора, возникающих в процессе отвалообразования в ущельях.

### Литература

1. Манукян Л.А. Разработка основ сооружения и безопасной эксплуатации отвалов и хвостохранилищ горнорудного производства: Автореферат дис. ... докт. техн. наук.- Ереван, 2008.- 35 с.
2. Афанасьев Б.Г., Шманин И.Б. Расчет устойчивости откосов с учетом действующих боковых сил // Изв. Вузов. Горный журнал.- 1990.- №5.- С. 41-44.
3. Аханов Г.М. Порядок выемки запасов и погашения многоярусных выработанных пространств // Горный журнал.- 2006.- № 1.- С. 48 - 51.
4. Галустьян Э.Л. Управление геомеханическими процессами в карьерах. – М.: Недра, 1980.- 237 с.
5. Галустьян Э.Л. Конструкция нерабочих бортов карьеров по критерию их устойчивости // Горный вестник. - 1998.- № 5.- С. 12-15.
6. Ершов Н.П. Опыт организации складирования больших объемов скальных пород в условиях сильно пересеченной местности // Горнорудное производство. Совершенствование вскрытия и технологии разработки месторождений открытым способом / Институт горного дела МЦМ СССР. – Свердловск, 1978. – С. 39-44.
7. Комаров В.В. Решение объемной (трехмерной) задачи об устойчивости откосов в скальных трещиноватых породах // Горнорудное производство. Совершенствование вскрытия и технологии разработки месторождений открытым способом / Институт горного дела МЦМ СССР. – Свердловск, 1978. – С. 44-53.
8. Попов В.Н., Ли А.П., Попов И.И. Объемное решение задачи по определению параметров уступов в скальных трещиноватых породах // Изв. Вузов. Горный журнал. – 1967. – № 3.- С. 32-34.
9. Галустьян Э.Л. Методы оценки устойчивости откосов нагорных карьеров // Горный журнал. - 2002.- № 11-12.- С. 9 – 12.
10. Снитко Н.К. Статическое и динамическое давление грунтов и расчет подпорных стенок. – М.: Госстройиздат, 1963. – 294 с.
11. Абегиан Ц.Х., Дарбинян С., Алексанян Г.М. О параметрах многоярусных отвалов на наклонном основании в связи с порядком их образования // Научные труды НИГМИ.- Ереван, 1969.- Вып. VIII. - С. 25-53.
12. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов, уступов и отвалов строящихся и эксплуатируемых карьеров / ВНИМИ.- Л., 1972.– 162 с.

*Поступила в редакцию 07.04.2014.  
Принята к опубликованию 24.10.2014.*

**ԿԻՐՃՈՒՄ ԶԵՎԱՎՈՐՎՈՂ ԲԱԶՄԱՍՏԻՃԱՆ ԼՅԱԿՈՒՅՏԻ ԿԱՅՈՒՆՈՒԹՅԱՆ ՈՐՈՇՄԱՆ  
ՄԵԹՈՂԻ ԿԱՏԱՐԵԼԱԳՈՐԾՈՒՄԸ**

**Լ.Ա. Մանուկյան**

Հարթ տարածքներում և ռելիեֆային բարդ պայմաններում բազմաստիճան լցակույտերի կազմավորման տեխնոլոգիական լուծումները միմյանցից զգալիորեն տարբերվում են: Չնայած դրան, լցակույտերի կայունության որոշման մեթոդական ցուցումներում մշակված է լցակույտերում պահող և տանող ուժերի տեղաբաշխման նույն մոտեցումը: Կիրճի համարժեք նյութերից պատրաստված ծավալային մոդելով բազմաստիճան լցակույտի կազմավորման ընթացքի հետազոտությունը ցույց է տվել, որ որոշակի բարձրությունից սկսած լցակույտի առանցքայի հարթության վրա առաջ են գալիս տարահորող ուժեր: Վերջիններիս հաշվի առնելը կիրճերում կազմավորվող լցակույտերի կայունության որոշման հաշվարկային մոդելներում հնարավորություն կտա բարձրացնելու պահեստավորվող մակաբացման ապարների արդյունավետ և անվտանգ ծավալների որոշման ճշտությունը: Կիրճի թեք հիմնատակի վրա բազմաստիճան լցակույտի կազմավորման պայմանների համար լուծված է ծավալային խնդիր, որում լցակույտի ապարային զանգվածում ակտիվ ճնշման և հենման պրիզմաների միջև լարվածային ուժերի փոխազդեցության հետ միասին հաշվի են առնվել նաև լցակույտի կազմավորման ընթացքում կիրճի կողային մակերևույթներից առաջացող ռեակտիվ ուժերի տարահորման լրացուցիչ ազդեցությունները:

**Առանցքային բառեր.** կիրճ, բազմաստիճան լցակույտ, լանջ, երկնիստ անկյուն, տարահորման ուժեր, առանցքային հարթություն, կայունություն:

**IMPROVING THE METHOD FOR DETERMINING THE STABILITY OF A MULTI-TIERED DUMP UNDER CONSTRUCTION IN A GORGE**

**L.A. Manukyan**

Technological solutions for the multi-tiered dump construction on plains and complex relief conditions significantly differ from each other. However, in the methodical instructions on calculation of the dump stability, a unified approach at determining the distribution of resistant and shearing forces occurring in the dump body is developed. The study of the multi-tiered dump construction process in the gorge on three-dimensional models made of equivalent materials has shown that beginning from a certain height, in the axial plane of the dump, the forces of thrust occur. The inclusion of the latter in the designed models on for determining the stability of dumps constructed in the gorges will allow to improve the accuracy of determining the rational and safe volumes of dumped overburden rocks. The three-dimensional problem of establishing the correlation of forces between the active pressure prisms and the stop considering the additional impact of the reaction forces from the side surfaces of the gorge resulting during the dump construction on the inclined base of the gorge.

**Keywords:** gorge, multilevel, dump, slope, dihedral angle, forces of thrust, axial plane, stability.