

Б.А. Борзаковский, В.Н. Аптуков, С.В. Волегов
**ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА
ОБРАЗОВАНИЯ КАРСТОВЫХ
ПРОВАЛОВ НА СОЛЕОТВАЛАХ**

На солеотвалах ПАО «Уралкалий» вследствие образования карстовых полостей происходят провалы. Эти явления представляют опасность для обслуживающего персонала и оборудования. Для оценки опасности проведены инженерные расчеты и математическое моделирование геомеханических процессов, происходящих в карстовых полостях. Инженерными методами расчета установлено, что при толщине потолочины 3 м и перемещении по ней автотракторной техники возможно образование провала. Математическое моделирование геомеханических процессов проведено с использованием пакета ANSYS 14.5. При моделировании приняты физико-механические характеристики массива солеотвала БКПРУ-2 ПАО «Уралкалий». Начальная форма полости принята конической с верхней сферической частью радиусом 1,5 м. Установлено, что рост полости происходит за счет конвергенции и разрушения боковой поверхности полости. Скорость конвергенции зависит от физико-механических характеристик массива солеотвала и изменяется от времени. В результате этого процесса увеличивается пролет потолочины, что приводит к обрушению. Карстовую полость можно считать безопасной в течение 5 лет на солеотвале высотой 20 м при толщине потолочины 6–8 м, при высоте 40 м и толщине 8–10 м, при высоте 60 м и толщине 12–15 м. Засыпка обнаруженной полости на 90% объема уменьшает скорость ее роста и увеличивает безопасное время. Ключевые слова: солеотвал, карстовая полость, потолочина, провал, конвергенция, засыпка.

На солеотвалах ПАО «Уралкалий» кроме поверхностных карстовых образований в основном в виде колодцев имеются и внутрисолевые. Внутрисолевого карст проявляется в виде провалов. Провалы прослеживаются на откосах и в центральной части солеотвала, высота которого не превышает 30 м. Карст отмечается в местах, где имеются условия поступления и скопления воды на подошве солеотвала, например, родниковые воды и поступление внешних вод при сложном рельефе подошвы. Исследования процесса формирования внутрисолевого карста на солеотвалах не проводились.

Наличие карстовых полостей представляет потенциальную опасность при складировании солеотходов для обслуживающе-

го персонала и оборудования. В настоящее время началось проведение геофизических исследований с целью определения расположения карстовых полостей в массиве солеотвала. Однако факт наличия и даже расположения карстовой полости является лишь первым шагом для оценки опасности образования провала. В настоящей работе рассмотрены геомеханические процессы, приводящие к образованию провала, и варианты инженерного расчета обрушения потолочины карстовой полости.

Критерием возникновения опасности является обрушение потолочины. Из этого следует, что необходимо определить предельные размеры потолочины, при которых происходит ее обрушение.

Нагрузка на потолочину складывается от собственного веса и веса оборудования, находящегося на нем. Расчетная схема показана на рис. 1; на рис. 1, а нагрузка от оборудования сосредоточенная (колесо машины), на рис. 1, б распределенная (гусеничная техника).

Оценка прочности потолочины учитывает тот факт, что верхний слой солеотвала, как правило, разрыхлен поверхностным карстом и не является несущим. Толщина этого слоя около метра. Минимальная толщина несущего слоя потолочины h_n , м, определена расчетами на срез и изгиб. При расчете на срез:

$$h_n = \frac{\left(\frac{M}{\pi r} + rh_0\gamma\right)}{(2c - r\gamma)} \quad (1)$$

При расчете на изгиб круглой защемленной пластины под действием распределенной нагрузки максимальные растягивающие напряжения определяются приближенно по формуле [1]

$$\sigma = 0,75 \frac{qr^2}{h_n^2} = \sigma_p, \quad (2)$$

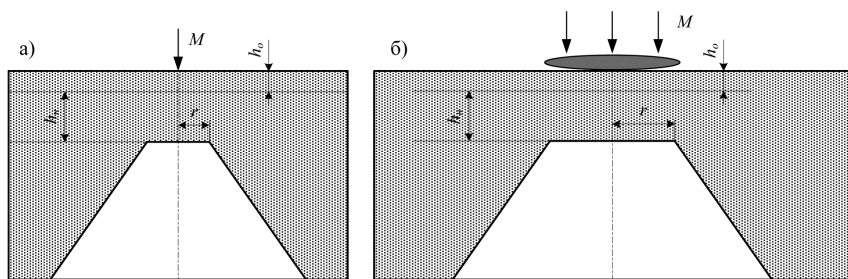


Рис. 1. Расчетная схема потолочины

$$q = \frac{M + \pi\gamma r^2(h_n + h_0)}{\pi r^2}, \quad (3)$$

где σ_p – предел прочности при растяжении.

В этом случае, уравнение для определения предельной мощности потолочины сводится к квадратному уравнению

$$\frac{4}{3}\pi\sigma_p h_n^2 = M + \pi\gamma r^2(h_n + h_0) \quad (4)$$

Результаты расчетов безопасной полной мощности потолочины $h_0 + h_n$ для следующих параметров ($\sigma_p = c = 0,1$ МПа; $\gamma = 0,015$ МН/м³; $h_0 = 1$ м) при внешней нагрузке $M = 0,1$; $0,4$ МН приведены в табл. 1.

Таким образом, при перемещении техники по солеотвалу минимальная толщина потолочины с учетом разрыхленного слоя должна быть не менее 3–4 м.

В случае, когда по данным геофизических исследований карстовая полость имеет потолочину, мощность которой превосходит вышеуказанные значения (табл. 1), опасность провала сохраняется вследствие изменения размеров полости и может реализоваться через некоторое время.

Для более точной оценки безопасных размеров потолочины с учетом временных факторов был проведен комплекс расчетов в пакете ANSYS 14.5. Солеотвал, расположенный на грунтовой основе с начальной полостью различной геометрии (размеров), моделировался упруго-вязкопластической средой в 2D осесимметричной постановке. В расчетах учитывались сила тяжести массива (с переменной по высоте солеотвала плотностью) и переменная по высоте прочность на сжатие.

Определение физико-механических свойств солеотвалов показало значительные изменения свойств, зависящие от высоты и его возраста. Наименьшую прочность имеет солеотвал БКПРУ-2.

Изменение механических свойств по вертикали (удельный вес и прочность на сжатие) взяты из работы [2] для скважины

Таблица 1

Радиус r , м	Расчет на срез		Расчет на изгиб	
	$M = 0,1$ МН	$M = 0,4$ МН	$M = 0,1$ МН	$M = 0,4$ МН
1	1,3	1,8		
2	1,3	1,6	2,1	2,5
3	1,4	1,6	2,7	2,9
4	1,5	1,7	3,5	3,7

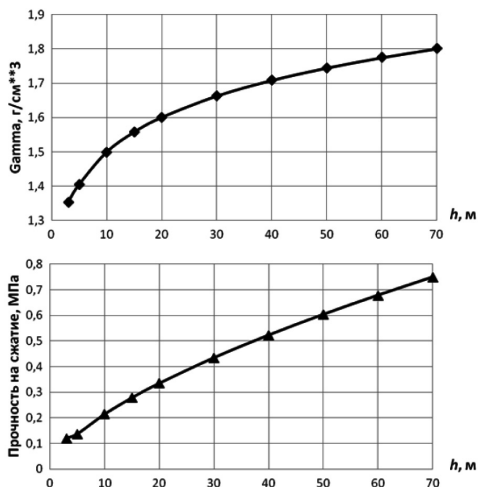


Рис. 2. Распределение удельного веса и прочности на сжатие по глубине солеотвала (скважина № 3505)

№ 3505 на руднике БКПРУ-2, значение модуля упругости принималось пропорциональным значению предела прочности.

Характерная скорость ползучести оценивалась по данным длительных испытаний образцов солеотвала [2], принято следующее значение 10^{-5} час^{-1} .

В качестве критерия разрушения материала солеотвала применялся оригинальный деформационный критерий разрушения [3], согласно которому разрушение материального элемента происходит при достижении деформации предельного значения, зависящего от вида напряженного состояния.

Введен коэффициент запаса прочности по предельным деформациям (аналогично коэффициенту запаса прочности по напряжениям) в виде

$$n_\epsilon = \frac{\epsilon_1^{np}(k)}{\epsilon_1}, \quad k = \frac{p}{\sigma_u} \quad (5)$$

где ϵ_1 — главная растягивающая деформация, накопленная к текущему времени; ϵ_1^{np} — предельная растягивающая деформация как функция текущего коэффициента жесткости напряженного состояния k ;

$p = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$ — среднее (гидростатическое) давление;

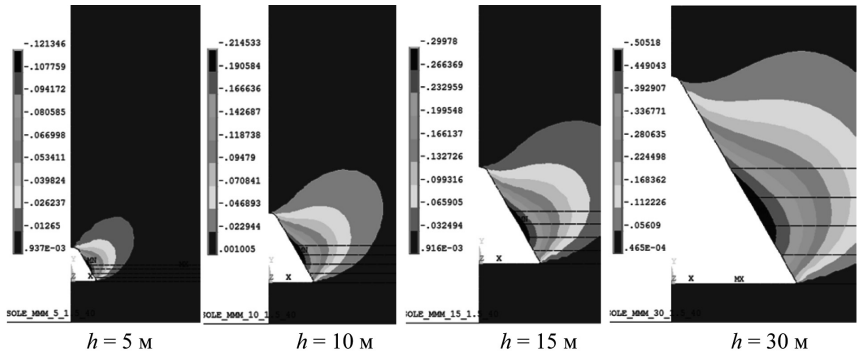


Рис. 3. Поле горизонтальных перемещений ($T = 1$ год)

$$\sigma_u = \left(\frac{3}{2} S_{ij} S_{ij} \right)^{1/2} - \text{интенсивность напряжений};$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - p\delta_{ij} - \text{компоненты дивергента тензора напряжений.}$$

Рассмотрены полости различной высоты и радиуса основания в солеотвалах с высотой 20 м, 40 м и 60 м. Радиус верхней (сферической) части полости во всех расчетах принят равным 1,5 м. Угол наклона боковой поверхности карстовой полости с горизонтом полагался равным 60° .

Расчеты показывают, что максимальные горизонтальные и вертикальные перемещения (конвергенция) стенок полости достигаются в ее центральной части, что и обуславливает на определенном этапе ее развития переход к сферической форме.

Поля перемещений при различной высоте полости (высота солеотвала 40 м) представлены на рис. 3, 4.

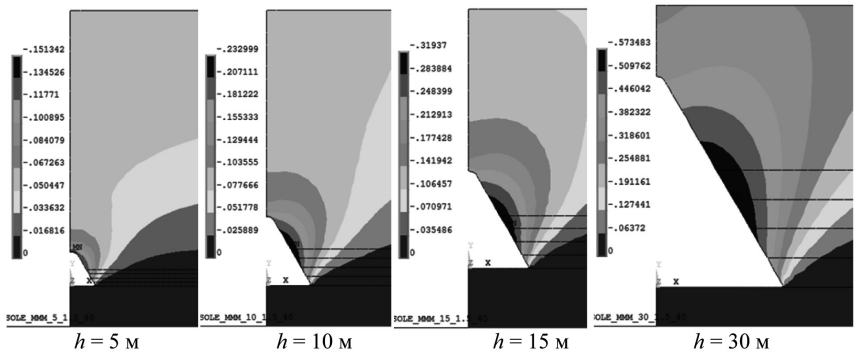


Рис. 4. Поле вертикальных перемещений ($T = 1$ год)

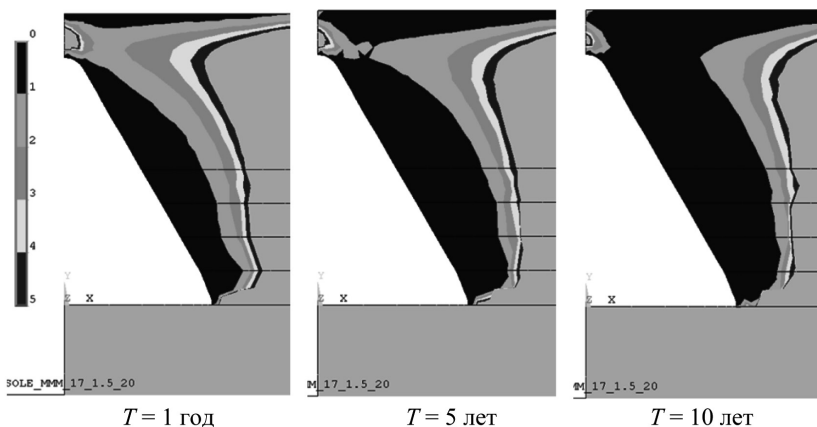


Рис. 5. Поле коэффициента запаса прочности для различных моментов времени (высота солеотвала 20 м, высота полости 17 м, мощность потолочины 3 м)

Максимальные горизонтальные перемещения (рис. 3) равны 12,1 см ($h = 5$ м); 21,5 см ($h = 10$ м); 30,0 см ($h = 15$ м); 50,5 см ($h = 30$ м).

Максимальные вертикальные перемещения (рис. 4) равны 15,1 см ($h = 5$ м); 23,3 см ($h = 10$ м); 31,9 см ($h = 15$ м); 57,3 см ($h = 30$ м).

За счет конвергенции стенок полости происходит потеря устойчивости, разрушение боковой поверхности и увеличение

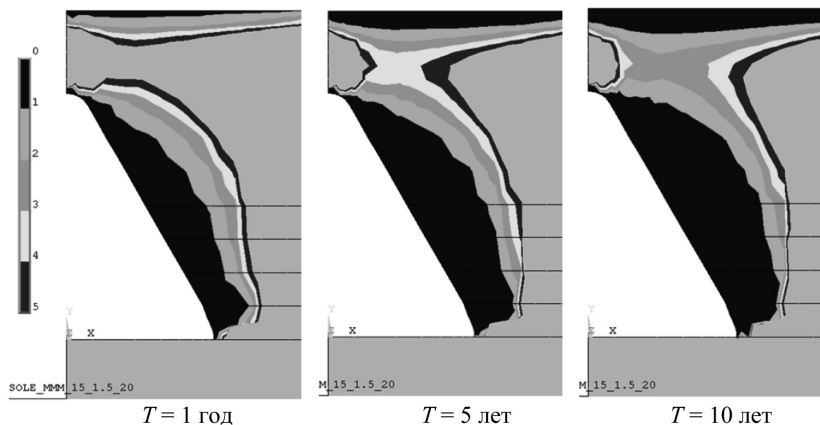


Рис. 6. Поле коэффициента запаса прочности для различных моментов времени (высота солеотвала 20 м, высота полости 15 м, мощность потолочины 5 м)

размеров пролета потолочины, что может привести к ее обрушению.

Обнаружено, что возможность образования провала (обрушения) определяется в основном минимальной мощностью потолочины (расстоянием между кровлей центра полости и поверхностью солеотвала), которая увеличивается с ростом высоты солеотвала.

На рис. 5 показано развитие области разрушения (темный цвет, $n_e \leq 1$) в окрестности полости с течением времени.

Как видно из рис. 5 (темная область соответствует разрушенному материалу солеотвала), стенки полости теряют устойчивость (разрушаются), с течением времени полость приобретает форму, близкую к сферической. Уже после 3–4-х лет происходит смыкание внутренней и внешней зон разрушения, это означает образование провала, диаметр которого постепенно увеличивается.

На рис. 6 показаны области разрушения материала солеотвала в окрестности полости с минимальной мощностью потолочины 5 м. Здесь наблюдается более устойчивая ситуация в течение 5–10 лет.

Был рассмотрен солеотвал с более высокой прочностью на сжатие (от 3 МПа на поверхности до 5 МПа — основание), высотой 20 м с мощностью потолочины 3 м и 5 м. На рис. 7, 8 показаны поля коэффициента запаса прочности (области разрушения), аналогичные представленным на рис. 5, 6. Подобные

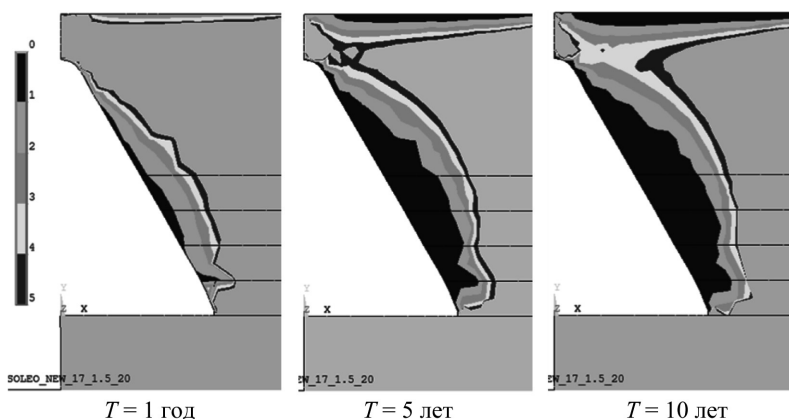


Рис. 7. Поле коэффициента запаса прочности для различных моментов времени (высота старого, более прочного солеотвала 20 м, мощность потолочины 3 м)

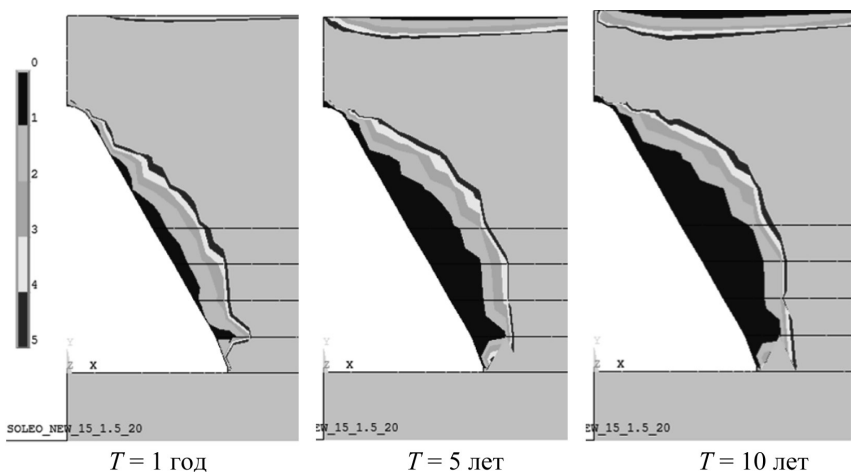


Рис. 8. Поле коэффициента запаса прочности для различных моментов времени (высота старого, более прочного солеотвала 20 м, мощность потолочины 5 м)

солеотвалы с высокой прочностью формируются в течение нескольких десятков лет (старые солеотвалы).

Моделирование показывает, что для старого, более прочного солеотвала потолочина мощностью 3 м может быть временно (до 5 лет) безопасной, а мощностью 4–5 м – безусловно безопасной.

В настоящее время образовавшиеся провалы засыпают солеходами. При обнаружении геофизическими методами кар-

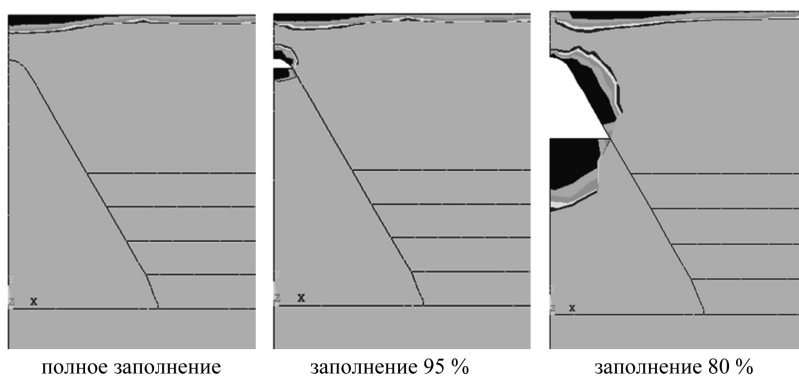


Рис. 9. Области разрушения солеотвала для различных вариантов заполнения полости, $T = 5$ лет

стовых полостей целесообразна их засыпка. Для оценки эффективных параметров засыпки были проделаны расчеты для полостей заполненных солеотходами. Области разрушения солеотвала с полостью при различной степени заполнения показаны на рис. 9.

Из рис. 9 следует, что заполнение полости на 80% объема не устраняет конвергенцию и разрушение стенок незасыпанной части полости. Отсюда следует, что степень заполнения полости должна достигать 90–95%.

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы

1. Инженерные расчеты и математическое моделирование показали, что образование провалов определяется толщиной потолочины над карстовой полостью.

2. Образование провала возможно при толщине потолочины 3 м и перемещении по ней автотракторной техники.

3. Карстовую полость можно считать безопасной в течение 5 лет на солеотвале высотой 20 м при толщине потолочины 6–8 м, при высоте 40 м и толщине 8–10 м, при высоте 60 м и толщине 12–15 м.

4. Засыпка обнаруженной полости на 90% объема уменьшает скорость ее роста и увеличивает безопасное время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Феодосьев В. И.* Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1972. – 5444 с.

2. Выполнить комплекс физико-механических свойств грунтов солеотвала БКПРУ-2. Отчет КамНИИКИГС, ОАО «Уралкалий». – Пермь, 2009.

3. *Аптуков В. Н.* Деформационный критерий разрушения соляных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2016 (в печати). **ИДБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Борзаковский Борис Александрович*¹ – кандидат технических наук, советник генерального директора,

*Аптуков Валерий Нагимович*¹ – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник,

e-mail: rusakov.mihail@gallurgy.ru,

Волегов Сергей Владимирович – магистр, Пермский государственный национальный исследовательский университет,

¹ ОАО Уральский научно-исследовательский

и проектный институт галургии (ОАО «Галургия»).

**GEOMECHANICAL ASSESSMENT
OF KARST SINKHOLE FORMATION
ON SALT TAILINGS PILES**

Due to karst caverns formed on salt tailings piles of Uralkali PJSC sinkholes occur. These events are dangerous for operating personnel and equipment. To estimate the danger engineering analysis and mathematical modelling of geomechanical processes in karst caverns have been performed. Using engineering analysis methods it has been established that a cap pillar of 3 m thickness and automotive vehicle moving on it can cause a sinkhole.

Mathematical modelling of geomechanical processes has been performed using ANSYS 14.5 package. Physical and mechanical properties of salt tailings pile massifs of Berezniki potash plant and mine 2 of Uralkali PJSC have been accepted by modelling. Initial form of the cavern has been accepted conic with upper spherical part of 1.5 m radius. It has been established that the cavern is growing due to convergence and destruction of side surface of the cavern. Convergence velocity depends on physical and mechanical properties of salt tailings pile massifs and changes from time.

As a result of this process cap pillar span increases and leads to rockfall. Karst cavern can be considered as safe during 5 years on salt tailings pile of 20 m height by cap pillar thickness of 6–8 m, of 40 m height and 8–10 m thickness, of 60 m height and 12–15 m thickness. Backfill of the found cavern at 90% volume decreases velocity of its growth and increase safe time.

Key words: salt tailings pile, karst cavern, cap pillar, sinkhole, convergence, backfill.

AUTHORS

*Borzakovskiy B.A.*¹, Candidate of Technical Sciences,
Adviser to General Director,

*Aptukov V.N.*¹, Doctor of Technical Sciences,
Professor, Chief Researcher,
e-mail: rusakov.mihail@gallurgy.ru,

Volegov S.V., Magister, Perm National Research
Polytechnic University, 614990, Perm, Russia,

¹ Open Joint Stock Company Ural Research
and Development Institute of Halurgy (Galurgia OJSC),
614000, Perm, Russia.

REFERENCES

1. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov* (Strength of materials), Moscow, Nauka, 1972, 5444 p.

2. *Vypolnit' kompleks fiziko-mekhanicheskikh svoystv gruntov soleotvala BKPRU-2. Ochet KamNIKIGS, OAO «Uralkaliy»* (To perform a complex of physical and mechanical properties of salt tailings pile ground of Berezniki potash plant and mine 2 of Uralkali OJSC, Report KamNIKIGS), Perm, 2009.

3. Aptukov V.N. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2016 (in print).

