



Б.В. Лаптев,
д-р техн. наук, ст. науч. сотрудник,
laptevbv@mail.ru

ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия

Теоретические исследования механического состояния соляных пород

Представлены результаты натуральных и аналитических исследований распределения нагрузок в приконтурном массиве и механического состояния пород в нем. Соляные породы предложено рассматривать как упруговязкопластичную среду, для математического анализа которой приведена усовершенствованная структурная модель. Даны аналитические зависимости для расчетов размеров зон пластифицированных и трещиноватых пород в приконтурном массиве, а также величин напряжений и деформаций в них.

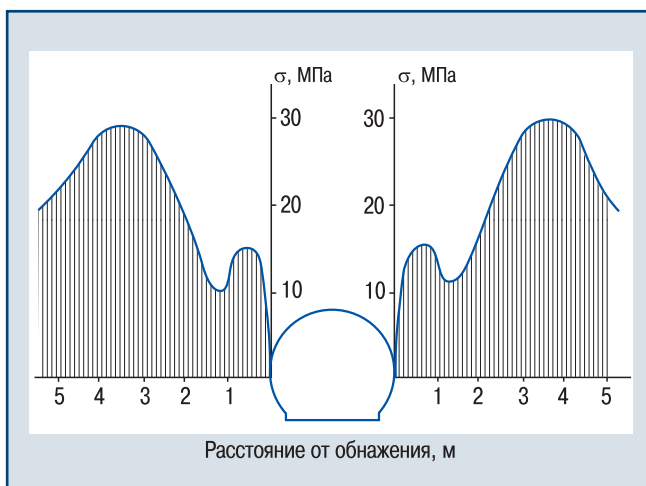
Ключевые слова: соляные породы, упруговязкопластичная среда, структурные модели пород, распределение нагрузок в породах вокруг выработки, аналитические зависимости для расчета нагрузок.

DOI: 10.24000/0409-2961-2017-4-54-57

Введение

Для аналитических расчетов напряженно-деформированного состояния (НДС) пород вокруг выработок и решения других краевых задач необходимо знать математические модели, которые учитывают особенности деформирования и разрушения соляных пород.

Результаты многочисленных натуральных исследований по диагностике приконтурного массива соляных пород контактным методом показали на наличие в нем зон различной прочности и неравномерного распределения полей средних напряжений и деформаций (рис. 1) [1], что было подтверждено результатами математического моделирования [2], а также непрохождением сигнала на определенном участке при микросейсмопрозвучивании приконтурных пород.



▲ Рис. 1. Распределение напряжений σ в стенках одиночной выработки

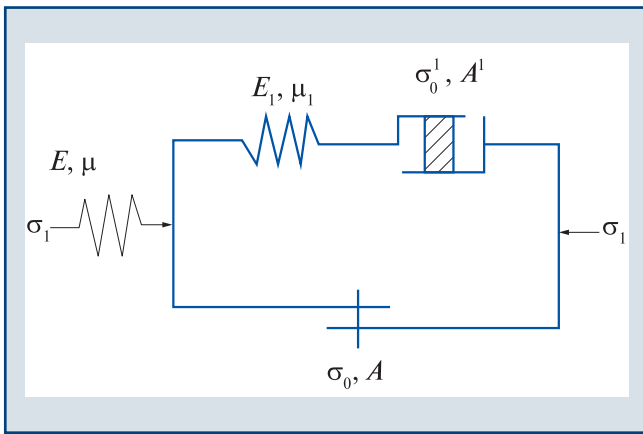
На основании результатов лабораторных и натуральных изучений прочностных и деформационных

свойств соляных пород установлено, что на разных стадиях деформирования и при различных режимах нагружения соляные породы обладают упругими, вязкими и пластическими свойствами. Аналогичного мнения придерживается широкий круг геомехаников, занимающихся изучением свойств соляных пород [3, 4].

Модели пород

Для описания связей между деформациями и напряжениями, которые необходимы для решения широкого круга задач по повышению безопасности ведения горных работ, в аналитической форме (математические модели) используют различные механические (структурные) модели деформирования тел. Поведение пород в области пластических деформаций может быть смоделировано комбинацией идеально упругого тела (пружины) и идеально вязкого тела Ньютона. Последнее представляет собой поршень с отверстиями, движущийся в цилиндре, наполненном вязкой жидкостью. Параллельное соединение этих тел дает модель Кельвина — Фойгта, последовательное — тела Максвелла. На рис. 2 изображена реологическая модель с элементами различных сред: упругая (Гука), вязкая (Ньютона), упруговязкая (Кельвина — Фойгта), упруговязкая (Максвелла), пластичная (Сен-Венана).

По данным многих исследователей, соляную среду необходимо рассматривать как упруговязкопластичную. В обобщенной модели с элементами кратковременной и длительной прочности при нагрузках, больших кратковременной, деформация пород становится неопределенной, а в случае промежуточной нагрузки модель «работает» как модель Шведова — Бингама (схема без упругого элемента — пружины). При быстром нагружении большие напряжения воспринимают упругий и вязкий элементы, однако с течением времени сопротивление



▲ Рис. 2. Реологическая модель пород:

σ_1 — усилие сжатия, МПа; E — модуль упругости Гука при условно-мгновенной деформации, МПа; μ — коэффициент Пуассона; E_1, μ_1 — соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона квазиупругих пород; σ_0^1 — остаточная прочность пород, МПа; A^1 — параметр, зависящий от угла внутреннего трения пород с остаточной прочностью; σ_0 — предел прочности пород на одноосное сжатие, МПа; A — параметр, зависящий от угла внутреннего трения пород с начальной прочностью

последнего уменьшается и все большая доля напряжений передается на пластический элемент длительной прочности. В случае если кратковременная нагрузка меньше длительной, модель «работает» как упругая.

По мнению Н.С. Булычева [5], для каменной соли справедливо применение реологической модели, содержащей элемент условно-мгновенной деформации, элементы вязкоупругих и вязкопластических деформаций. При кратковременной нагрузке ниже длительной модель ведет себя как модель Го-генемзера — Прагера.

Ползучесть соляных пород по И.Х. Габдрахимову может быть описана уравнением наследственности Роботного [6].

Задача о НДС пород вокруг круглой выработки для модели упруговязкопластичной среды решена С.А. Константиновой. Вязкопластический элемент, по ее мнению, начинает работать при превышении предела упругости. Закон пластического течения ассоциируется с условием пластичности Мизеса. Начальное распределение напряжений соответствует упругому. Вокруг выработок со временем образуется зона неупругих деформаций, в которой происходит релаксация напряжений [7]. Предложена упруговязкопластическая модель деформирования соляных пород во времени, позволяющая учесть накопление необратимой деформации и пластическое разрыхление в процессе ползучести.

Более сложная модель соляных пород разработана Ш. Сератой [8], в которой содержится 12 структурных элементов. Часть из них отвечает за изменение формы, другая — объема материала, это также упруговязкопластическая модель.

Геомеханические процессы в породах

По данным исследований, результаты которых представлены в работах [9, 10], в соляных породах наблюдаются некоторые геомеханические процессы, не поддающиеся объяснению с позиций рассмотренных моделей. Так, упругопластические деформации в породах начинаются впереди движущегося забоя, вблизи которого формируются два пика повышенных напряжений со спадом нагрузок между ними. В приконтурном массиве происходят постоянная миграция максимума нагрузок и смена знака деформирования отдельных интервалов пород. Со временем в приконтурных породах дополнительный максимум концентрации напряжений релаксирует и образуется значительных размеров зона пластических деформаций, а на кромке (у контура выработок) — зона пород с остаточной прочностью.

Указанное поведение пород объясняет модель, в которой, наряду с существующими элементами упругости, пластичности, в элемент пластичности вводят новый элемент жесткости, который разрывается от нагрузок без деформирования на любом из этапов и представляет собой идеально хрупкую структуру породы. Используя модель с известными элементами (упругие, пластические, вязкие) в различных сочетаниях, можно объяснить состояние материала в запредельной зоне.

Для анализа различных стадий квазиупругого состояния породного материала рассмотрим задачу о распределении расчетных нормальных напряжений вокруг выработки круглого сечения (рис. 3), начальное распределение которых принимается как гидростатическое. Общее решение задачи упругопластической системы ведется с использованием предела прочности пород на одноосное сжатие σ_0 , остаточной прочности σ_0^1 . В случае когда напряжения достигли предела прочности σ_0 вокруг выработки, образуются зоны, претерпевающие следующие стадии развития (см. рис. 3):

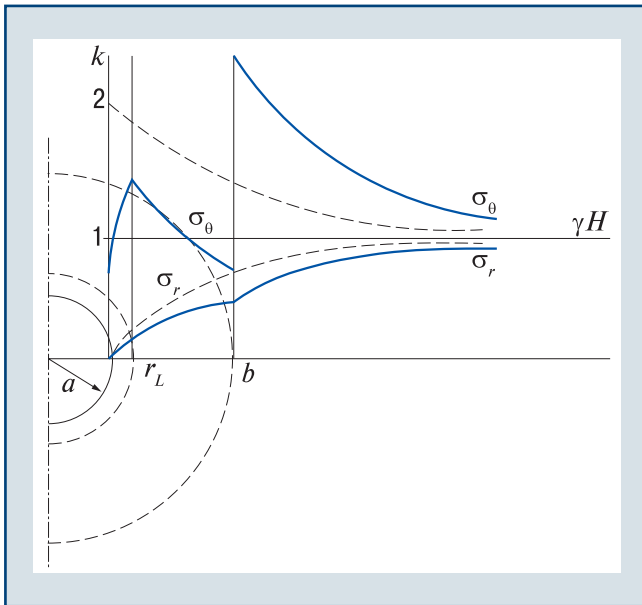
$a < r \leq r_L$ — пластическая зона; $b < r \leq \infty$ — упругая зона; $r_L < r \leq b$ — квазиупругая зона, в которой может возникнуть кластическая (трещиноватая) среда вследствие разрыва жесткого элемента, где a — радиус выработки; r — текущий радиус; r_L, b — мощность соответственно пластической и квазиупругой зон (см. рис. 3).

Критерием прочности в третьей теории прочности принято наибольшее касательное напряжение, т.е.

$$\sigma_p \leq \sigma_1 - \sigma_3 \leq \sigma_{сж}$$

где σ_p — предел прочности пород на растяжение, МПа; $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — параметры тензора напряжений, МПа; $\sigma_{сж}$ — предел прочности пород на сжатие, МПа.

Для материалов с различными пределами прочности на сжатие третью теорию прочности дополняют предположением о том, что максимальное касательное напряжение — функция среднего нор-



▲ Рис. 3. Распределение расчетных нормальных напряжений вокруг выработки круглого сечения:
 1 — γH ; 2 — $2\gamma H$; σ_r, σ_θ — напряжения соответственно радиальное и тангенциальное, МПа; k — коэффициент концентрации напряжений

мального напряжения $\tau = f(\sigma_{cp})$. Функция представляет собой огибающую предельных кругов Мора. Абсциссы и ординаты σ, τ точек касания кругов огибающими представляют нормальные и касательные напряжения, при которых начинается разрушение или пластическое деформирование пород.

Условие разрушения логичнее аппроксимировать в виде

$$\sigma_1 = A\sigma_3 \leq \sigma_{сж} \quad [10],$$

где A — параметр, зависящий от угла внутреннего трения пород ρ (градус), определяют в лабораторных условиях, $A = (1 + \sin \rho)/(1 - \sin \rho)$.

В упругой зоне поле напряжений определяют следующим образом:

радиальные напряжения, МПа,

$$\sigma_r = P_0 a^2 / r^2 + P(1 - a^2 / r^2); \quad (1)$$

тангенциальные напряжения, МПа,

$$\sigma_\theta = -P_0 a^2 / r^2 + P(1 + a^2 / r^2); \quad (2)$$

смещение пород, мм,

$$U_r = \frac{1-\mu}{E} Pr + \frac{1+\mu}{E} (P - P_0) \frac{a^2}{r^2} = \frac{dU_r}{dr}; \quad (3)$$

деформации пород, мм/м:
 радиальные

$$\varepsilon_r = \frac{1-\mu}{E} P - \frac{1+\mu}{E} (P - P_0) \frac{a^2}{r^2} = \frac{dU_r}{dr}, \quad (4)$$

тангенциальные

$$\varepsilon_\theta = \frac{1-\mu}{E} P + \frac{1+\mu}{E} (P - P_0) \frac{a^2}{r^2} = \frac{U_r}{r}, \quad (5)$$

если $P_0 = 0$, то $P = \sigma_\theta / (\gamma H)$,

где P_0 — внутреннее радиальное давление по контуру выработки ($r = a$); P — начальное радиальное давление в приконтурных породах, МПа; γ — объемный вес налегающих пород, т/м³; H — глубина горных работ от земной поверхности, м.

В зоне квазиупругого состояния ($b > r > a$) свойства материала составляют E' и μ' . Такая зона формируется при появлении трещин в породах:

радиальные напряжения, МПа,

$$\sigma'_r = \frac{b^2 P_* - a^2 P_0}{b^2 - a^2} - \frac{(P_* - P_0) b^2 a^2}{(b^2 - a^2) r^2}; \quad (6)$$

тангенциальные напряжения, МПа,

$$\sigma'_\theta = \frac{b^2 P_* - a^2 P_0}{b^2 - a^2} + \frac{(P_* - P_0) b^2 a^2}{(b^2 - a^2) r^2}. \quad (7)$$

В упругой зоне, когда есть квазиупругая зона ($r > b$), распределение напряжений аналогично (1) и (2), но вместо P_0 подставляем P_* , МПа, («ложный» контур). При $P_0 = 0$

$$P_* = \sigma'_\theta / (\gamma H). \quad (8)$$

Мощность, м, квазиупругой зоны определяют следующим образом:

$$b = \sqrt{\frac{\sigma'_\theta + (A' - 1) P_0}{\sigma'_r + (A' + 1) P_0 - 2P_*}} r_L, \quad (9)$$

мощность, м, пластической зоны:

$$r_L = a \frac{P_* (A' - 1) + \sigma'_\theta}{P_0 (A' - 1) + \sigma'_\theta} \frac{1}{A - 1}. \quad (10)$$

В последующем вблизи контура выработки формируется пластическая зона, а зона трещиноватости распространяется глубже. В пластической зоне поле напряжений, МПа, определяют таким образом:

радиальные напряжения

$$\bar{\sigma}_r = \left(\frac{r}{a}\right)^{A-1} \left(P_0 + \frac{\sigma'_\theta}{A' - 1}\right) - \frac{\sigma'_\theta}{A' - 1}, \quad (11)$$

тангенциальные напряжения

$$\bar{\sigma}_\theta = A' \left(\frac{r}{a}\right)^{A-1} \left(P_0 + \frac{\sigma'_\theta}{A' - 1}\right) - \frac{\sigma'_\theta}{A' - 1}. \quad (12)$$

Предел прочности пород на одноосное сжатие, МПа,

$$\sigma_0 = 2C \cos \rho / (1 - \sin \rho). \quad (13)$$

При расчетах прочности пород используют значения углов внутреннего трения ρ и ρ' и сцепления пород C и C' (МПа), соответствующие нетронутому массиву или трещиноватому, аналогично и для расчетных параметров A и A' .

Выводы

В статье представлено распределение рассчитанных нормальных радиальных σ_r и тангенциальных σ_θ напряжений в идеальнупругой среде и в соответствии с рассмотренной моделью. Получено, что на границе с кластической (трещиноватой) зоной отмечается максимум тангенциальных напряжений, а на границе пластической и кластической зон — дополнительный максимум.

Установлено совпадение расчетного распределения нагрузок в породах с натурными данными. Размер зоны пластических деформаций в зависимости от параметров выработок может развиваться до 2 м, а кластической — до 3 м. Появление дополнительного максимума напряжений объясняется блочным смещением приконтурных пород, их защемлением вблизи обнажения и возможностью нести определенную нагрузку. При этом смещающийся блок выступает в роли крепи, создающей подпор для более удаленных от контура пород.

Таким образом, соляные породы первоначально при приложении нагрузки ведут себя как упругие тела, затем появляется зона трещиноватости, а вблизи контура выработки — пластическая зона. На границе пластической и кластической зон отмечается максимум напряжений. Вокруг выработок в приконтурных породах могут формироваться зоны различной прочности.

Список литературы

1. Лаптев Б.В. Предотвращение газодинамических явлений на калийных рудниках. — М.: Недра, 1994. — 141 с.
2. Управление выбросоопасностью при разработке Верхнекамского месторождения калийных солей/ Б.Ш. Винокур, Б.В. Лаптев, И.Х. Габдрахимов, Б.М. Голубев// Горный журнал. — 1978. — № 9. — С. 68–71.
3. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. — М.: Недра, 1992. — 222 с.
4. Ерманов Ж.С., Бергман Э.И. Ползучесть соляных пород. — Алма-Ата: Наука, 1977. — 109 с.
5. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. — М.: Недра, 1982. — С. 143–148.
6. Габдрахимов И.Х. Исследование длительной прочности горных пород и совершенствование параметров системы разработки в условиях Верхнекамских калийных рудников: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Фрунзе, 1968. — 16 с.
7. Константинова С.А. Методы прогноза и обеспечения устойчивости капитальных выработок в соляных породах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Тула, 1993. — 41 с.
8. Serata S. Theory and model of underground openings and support system// Proceedings of the 6-th US Symposium on

Rock Mechanics. — Rolla: University of Missouri, 1964.

9. Винокур Б.Ш., Лаптев Б.В. Напряженно-деформированное состояние пород вокруг выработки при ведении очистных работ// Горный журнал. — 1977. — № 8. — С. 35–37.

10. Глушко В.Т., Виноградов В.В. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления. — М.: Недра, 1982. — 183 с.

laptevbv@mail.ru

Материал поступил в редакцию 28 февраля 2017 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2017, № 4, pp. 54–57.
DOI: 10.24000/0409-2961-2017-4-54-57

Theoretical Researches of Saliferous Rocks Mechanical Condition

Information about the Author

B.V. Laptev, Doctor of Technical Sciences, Senior Research Associate, laptevbv@mail.ru

STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russia

Abstract

Based on the results of laboratory and natural definitions of strength and deformation properties of saliferous rocks it is established that at different stages of deformation and at various modes of loading such saliferous rocks have elastic, viscous and plastic properties.

For description of the links between the deformations and stresses in the analytical form (mathematical models) various mechanical (structural) models of deformation of salt bodies are used. Noted that in the saliferous rocks some geomechanical processes are observed defying understanding from the positions of the considered models. So, plastoelastic deformation in the rocks begin ahead of a moving face, near which two peaks of the increased stresses with load fall between them are formed. At the near contour massive the following is occurring: constant migration of maximum of loads, change of sign of deformation of separate intervals of rocks. Eventually, in the near contour massive the additional maximum of concentration of stresses is relaxing and the significant zone of plastic deformations is formed, and at the edge (at the contour of workings) — the zone of rocks with residual strength.

Key words: saliferous rocks, elastoviscoplastic environment, structural models of rocks, distribution of loads in rocks around the working, analytical dependences for calculation of loads.

References

1. Laptev B.V. *Predotvrashhenie gazodinamicheskikh javlenij na kalijnyh rudnikah* (Prevention of the Gasdynamic Phenomena at the Potash Mines). Moscow: Nedra, 1994. 141 p.
2. Vinokur B.Sh., Laptev B.V., Gabdrahimov I.H., Golubev B.M. *Gornyj zhurnal = Mining Magazine*. 1978. № 9. pp. 68–71.
3. Stavrogin A.N., Protosenja A.G. *Mehanika deformirovaniya i razrusheniya gornyh porod* (Mechanics of Rock Deformation and Destruction). Moscow: Nedra, 1992. 222 p.
4. Erzhanov Zh.S., Bergman Je.I. *Polzuchest soljanyh porod* (Creep of Saliferous Rocks). Alma-Ata: Nauka, 1977. 109 p.
5. Bulychev N.S. *Mehanika podzemnyh sooruzhenij* (Mechanics of Underground Structures). Moscow: Nedra, 1982. pp. 143–148.
6. Gabdrahimov I.H. *Issledovanie dlitelnoj prochnosti gornyh porod i sovershenstvovanie parametrov sistemy razrabotki v usloviyah Verkhnekamskih kalijnyh rudnikov: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk* (Research of Long-Term Strength of the Rocks and Improvement of Parameters of System of Development in the Conditions of Verkhnekamsky Potash Mines: Synopsis of a Thesis. ... Candidate of Technical Sciences). Frunze, 1968. 16 p.
7. Konstantinova S.A. *Metody prognoza i obespecheniya ustojchivosti kapitalnyh vyrabotok v soljanyh porodah: avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk* (Methods of the Forecast and Ensuring Stability of the Permanent Workings in the Saliferous Rocks: Synopsis of a Thesis ... of the Doctor of Technical Sciences). Tula, 1993. 41 p.
8. Serata S. Theory and model of underground openings and support system. Proceedings of the 6-th US Symposium on Rock Mechanics. Rolla: University of Missouri, 1964.
9. Vinokur B.Sh., Laptev B.V. *Gornyj zhurnal = Mining Magazine*. 1977. № 8. pp. 35–37.
10. Glushko V.T., Vinogradov V.V. *Razrushenie gornyh porod i prognozirovanie pojavlenij gornogo davlenija* (Destruction of Rocks and Forecasting of the Rock Pressure Manifestations). Moscow: Nedra, 1982. 183 p.