

3. Гидроструйные технологии обработки горных пород /В.А. Бреннер [и др.]. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. 176 с.

*E.N. Beliakova, K.A. Golovin, I.V. Sapronov
PIPE DRIVING WITH CREATING PROTECTIVE SOIL-CONCRETE COVER
Combined using controllable piercing method jointly with hydro-jet cementation of ground (HJC) method is considered.
Keywords: pipe driving, piercing, HJC, combined using.*

Получено 10.05.12

УДК 622.363.023:624.121.54

Н.С. Булычёв, д-р техн. наук, проф., (4872) 35-20-41 (Россия, Тула, ТулГУ),
Д.С. Комаров, асп., (4872)-44-34-57, denkom87@mail.ru
(Россия, Тула, ТулГУ)

ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ МАССИВА СОЛЯНЫХ ПОРОД ДЛЯ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Проведён анализ физико-механических свойств пород соляной толщи верхнекамского месторождения, а также возможных моделей для описания реологических свойств массива. По результатам исследований выбрана модель Кельвина-Фойхта как наиболее подходящая.

Ключевые слова: Верхнекамское месторождение, ствол, каменная соль, реология, толщина, вязкие свойства материала, реологические модели, модель Кельвина-Фойхта.

Предметом данной работы является определение оптимальной модели для описания пород соляной толщи на Верхнекамском месторождении. В административном отношении лицензионный участок расположен в Усольском муниципальном районе и на территории, подчинённой г. Березники, в 15 км на юг от данного города (рис. 1).

Многими исследователями в разное время проводились наблюдения за конвергенцией массива. Самые главные результаты натурных исследований на Верхнекамском месторождении заключаются в следующем:

- стенки околоствольных выработок смещаются со средней скоростью 0,017...0,050 мм/сут;
- скорость смещения породного контура вблизи ствола выработки и на сопряжении с приствольными выработками на стадии установившейся ползучести значительно выше (в 10 раз), чем в одиночной выработке.

Из двух вышеприведённых пунктов следует, что самыми опасными участками горного комплекса являются вся приствольная область и сопряжения с горизонтальными и наклонными горными выработками, в ча-

стности. Следовательно, если составить модель для самого «узкого места» системы и решить её со всеми наложенными условиями, при этом, если решение позволит определить несущую способность крепи и срок её службы до капитального ремонта, то данное решение будет верно в любой другой (не экстремальной) точке системы.

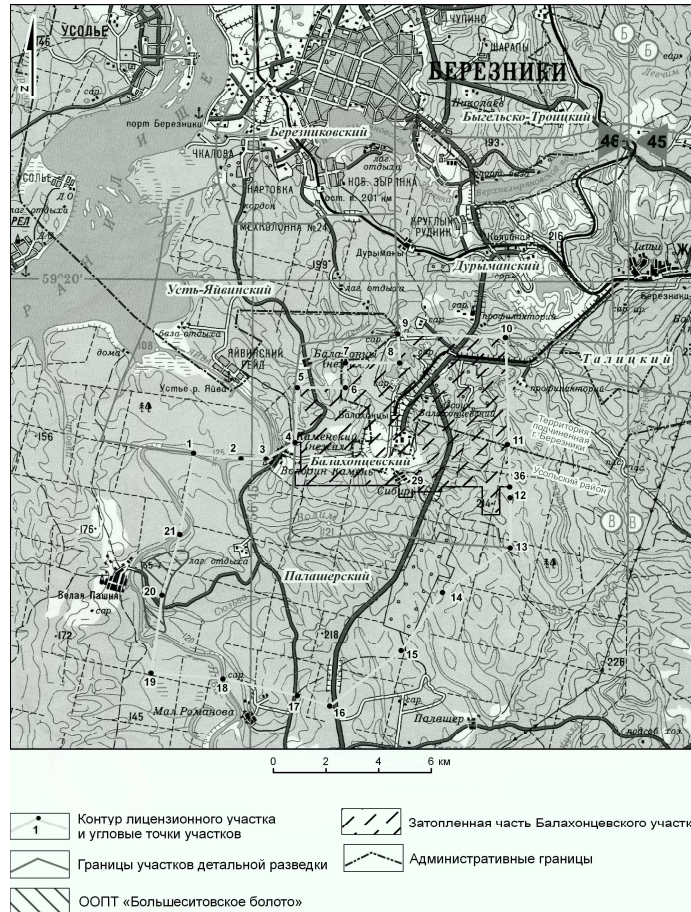


Рис. 1. Схема расположения скважин на лицензионном участке

Начнём составление системы «крепь - массив» с моделирования самого массива. Для этого воспользуемся работами А.Н. Ставрогина и А.Г. Протосеня:

$$\begin{cases} d\varepsilon_x = d\varepsilon_x^e + d\lambda(\sigma_x - \sigma), \\ d\varepsilon_y = d\varepsilon_y^e + d\lambda(\sigma_y - \sigma), \\ d\varepsilon_z = d\varepsilon_z^e + d\lambda(\sigma_z - \sigma), \end{cases} \begin{cases} d\gamma_{xy} = d\gamma_{xy}^e + 2d\lambda\tau_{xy}, \\ d\gamma_{xz} = d\gamma_{xz}^e + 2d\lambda\tau_{xz}, \\ d\gamma_{yz} = d\gamma_{yz}^e + 2d\lambda\tau_{yz}. \end{cases} \quad (1)$$

При этом $\lambda \in (-\infty; +\infty)$; $d\varepsilon^e \dots d\gamma_{xy}^e$ - приращения, составляющие упругую деформацию по результатам натуральных наблюдений (0,017... 0,050 мм/сут); τ_i - касательные напряжения;

При этом:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_y = \lambda \gamma H, \\ \sigma_z &= \gamma H, \\ \sigma_{cp} &= \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z).\end{aligned}\tag{2}$$

Тогда имеем

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z.\tag{3}$$

Стоит заметить, что ввиду явно выраженных реологических свойств ($\lambda \rightarrow 0$) наблюдаем случай равномерного всестороннего сжатия $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 7,26$ МПа на глубине в соляном массиве порядка 330 м. Данное утверждение полностью подтверждает модель гидростатического всестороннего (трёхосного) сжатия единичного куба (А.Я. Малкин, А.И. Исаев) (рис. 2):

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -p.\tag{4}$$

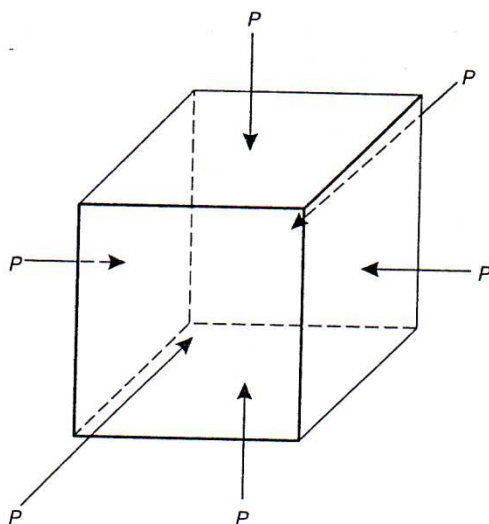


Рис. 2. Модель гидростатического давления p - всестороннего (трёхосного) сжатия единичного куба

Главные напряжения равны между собой и выражаются следующим образом. Знак «-» означает, что сила направлена внутрь каждого элемента объёма.

При этом гидростатическое давление, или простое давление, очевидно,

$$p = -\frac{\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}}{3} = -\frac{I_1}{3}.\tag{5}$$

В данном случае

$$p = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} = \frac{3\sigma_x}{3} = 7,26 \text{ МПа}.\tag{6}$$

Получается, что гидростатическое давление равно по величине все-стороннему сжатию - $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 7,26$ МПа, при этом касательные напряжения $\tau_i=0$, т.е.

$$\begin{aligned} \tau_1 = \frac{1}{2}|\sigma_x - \sigma_y| = 0 \\ \tau_2 = \frac{1}{2}|\sigma_y - \sigma_z| = 0 \\ \tau_3 = \frac{1}{2}|\sigma_z - \sigma_x| = 0 \end{aligned} \Rightarrow \begin{cases} d\varepsilon_x = d\varepsilon_x^e \\ d\varepsilon_y = d\varepsilon_y^e \\ d\varepsilon_z = d\varepsilon_z^e \end{cases} \text{ и } \begin{cases} d\gamma_{xy} = d\gamma_{xy}^e, \\ d\gamma_{xz} = d\gamma_{xz}^e, \\ d\gamma_{yz} = d\gamma_{yz}^e. \end{cases} \quad (7)$$

При этом получается, что конвергенция горного массива в численном выражении равна по величине приращению упругой деформации, т.е. 0,017...0,050 мм/сут.

Наиболее простым является уравнение деформационной теории пластичности, связывающее компоненты напряжения и деформации:

$$\begin{cases} \varepsilon_x - \frac{1}{3}\Theta^e = \psi(\sigma_x - \sigma), \\ \varepsilon_y - \frac{1}{3}\Theta^e = \psi(\sigma_y - \sigma), \\ \varepsilon_z - \frac{1}{3}\Theta^e = \psi(\sigma_z - \sigma). \end{cases}, \begin{cases} \gamma_{yz} = 2\psi\tau_{yz}, \\ \gamma_{xz} = 2\psi\tau_{xz}, \\ \gamma_{xy} = 2\psi\tau_{xy}. \end{cases} \quad (8)$$

Используя вышележащие преобразования, получим

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{3}\Theta^e, \\ \varepsilon_y = \frac{1}{3}\Theta^e \Rightarrow \varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \frac{1}{3}\Theta^e, \\ \varepsilon_z = \frac{1}{3}\Theta^e, \end{cases} \quad (9)$$

т. е. в соляном массиве имеем случай всестороннего единичного сжатия и всесторонней пластической деформации.

В качестве наглядной иллюстрации процесса конвергенции, предоставляется графическая интерпретация данного процесса в течение одного года на контуре незакреплённой выработки околоствольного двора.

Конвергенция массива пород за расчётный срок (50 лет) составит в самых опасных участках сопряжений порядка 36,3 до 41,3 см. При этом порядка 80 % прироста максимальных величин приходится именно на область сопряжений ствола с горизонтальными выработками.

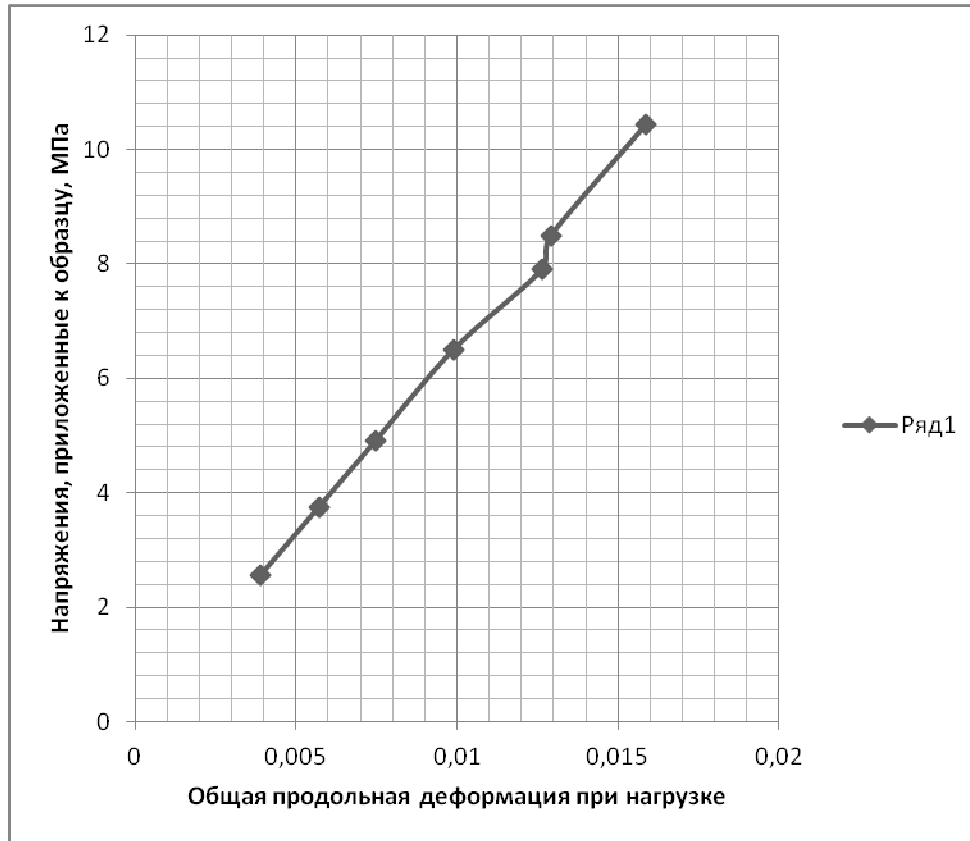


Рис. 3. Конвергенция соляного массива в окрестности незакреплённой выработки в течение года

Далее перейдём к описанию самого процесса ползучести, т.е. реологических свойств соляного массива. Функция ползучести по своему физическому смыслу - это возрастающая функция от времени, имеющая некоторый предел. Функция этого вида может быть представлена в вид:

$$\psi(t) = \sum_{i=1}^N J_J(\lambda_i) [1 - e^{-\frac{t}{\lambda_i}}], \quad (10)$$

где λ_i - это набор дискретных времён запаздывания; J_J - их «веса» или порциальные податливости

$$J(\lambda) = \frac{k(\ln \lambda)}{\lambda}, \quad (11)$$

где $k(\ln \lambda)$ - логарифмический спектр времени запаздывания.

При этом не стоит забывать о показателе вязкости η . Для жидкости $\eta < 0$, т.е. материал может почти бесконечно течь. Обращаясь к результатам многочисленных экспериментов, делаем вывод, что «текучесть» является свойством и соляных пород, т.е. в рассматриваемом массиве присутствуют необратимые деформации, которые присущи только вязкотекучим единицам. Не будем об этом забывать. Этот факт подтверждается и вышеприведёнными данными конвергенции соляного массива на Верхнекамском месторождении, рассчитанными на 50 лет эксплуатации

комплекса. Максимальное продвижение массива на 41,3 см нельзя назвать ничем иным, как наглядной демонстрацией текучести. А тот факт, что деформации в соляном массиве не затухают никогда и процесс конвергенции стремится к бесконечности, говорит о том, что имеем дело с необратимыми деформациями.

Также в общих случаях функция ползучести описывается с помощью единого времени запаздывания:

$$\psi(t) = J \left[1 - e^{-\frac{t}{x}} \right]. \quad (12)$$

Это уравнение называется моделью Кельвина-Фойхта.

Для того чтобы чётко представить себе реологический закон распределения, воспользуемся положением о заданных деформациях. Авторами было установлено, что величина конвергенции соляного массива вблизи ствола оставляет порядка 0,017...0,050 мм/сут (за 50 лет - порядка 36,3...44,3 см).

Вернёмся к более подробному описанию модели Кельвина-Фойхта:

$$X(t) = X_{\infty} (1 - e^{-\frac{t}{K/G}}) = EF_0 (1 - e^{-\frac{t}{K/G}}), \quad (13)$$

где K/G имеет смысл времени запаздывания.

Таким образом, оказалось, что комбинация компонент ведёт себя как вязкоупругая среда Кельвина-Фойхта.

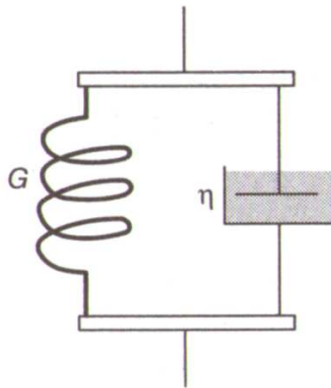


Рис. 4. Параллельно соединённые ёмкость с жидкостью и пружина - модель вязкоупругого тела Кельвина-Фойхта

Легко видеть, что модель Кельвина-Фойхта – это модель поведения твёрдого материала, поскольку приложение постоянной силы приводит к достижению некоторой, ограниченной деформации. Здесь стоит сделать остановку и вновь обратиться уже к исследованному массиву соляных пород. Основные деформации в незакреплённых выработках будут происходить в течение первых 200 - 400 дней в зависимости от глубины проходки и частных физико-механических свойств пород. После этого момента конвергенция будет продолжаться, но в гораздо меньших объёмах в годовом

исчислении. В результате натуральных наблюдений, проведённых на втором Березниковском руднике установлено, что на глубине 330 метров, в сильвинитовой толще, активная фаза конвергенции составляет порядка 370 дней. То есть с уверенностью можем утверждать, что в течение первых лет происходит наибольший объём деформаций пород (порядка 70...80 %), в оставшиеся же 40 - 45 лет эксплуатации происходит оставшаяся деформация, целиком и полностью обусловленная течением соляных пород. Согласно вышеприведённым сведениям можно с большой долей вероятности установить, что модель Кельвина-Фойхта (модель ограниченной деформации) наиболее полно удовлетворяет описанию соляного массива. Хотя в модели и отмечается эффект запаздывания.

Время релаксации в модели Кельвина-Фойхта отсутствует (точнее, оно неограничено велико). Действительно, модель выдерживает приложенную силу неограничено долго из-за растяжения пружины, которая не релаксирует.

Список литературы

1. Варварка П.М., Рябов А.Ф. Справочник по теории упругости. Киев: Будивельник, 1971. 413 с.
2. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей: монография. Пермь: ГИ УрО РАН, 2001. 429 с.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика сплошных сред. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1953. 788 с.
4. Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 939 с.
5. Малкин А.Я., Исаев А.И. Реология: концепции, методы, приложения. Санкт-Петербург: Профессия, 2007. 557 с.
6. Разработка соляных месторождений: сборник статей конференции. Пермь: ВНИИИГ, 1989.
7. Вопросы и теоретической и экспериментальной реологии горных пород: сб. статей. Вып. 1. Киев: Наукова думка, 1972. 54 с.

N.S. Bulichev, D.S. Komarov

CHOICING AND SUBSTANTIATION MODEL OF POTASSIC ROCKS FOR THE VERHNEKAMSKOE DEPOSIT

We carried out analysis of physical-mechanical properties of potassic rocks for the Verhnekamskoe deposit. We made analysis of possible models for description rheological rock massif properties. We prove results of researches, that choice Kelvin-Fojhte model as the most suitable.

Key words: Verhnekamsky deposit, shaft, stone salt, rheology, thickness, viscous properties of material, rheological models, Calvin-Fojhte model.

Получено 10.05.12