УДК 622.831

Н.С.КОНОНОВА
Факультет освоения подземного пространства,
аспирант кафедры механики

ГЕОМЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И СКВАЖИН В ВЯЗКОПЛАСТИЧНЫХ МАССИВАХ

Модель течения вязкой жидкости для оценки напряженно-деформированного состояния калийной соли, находящейся в объемном напряженном состоянии при достаточно высоком уровне действующих напряжений, позволяет описать поведение соляных массивов, в частности процесс затекания (конвергенции контура) выработки в толще массива с течением времени.

Изложенное решение справедливо только для малых по сравнению с толщиной слоя пород смещений. Кроме того, предполагается, что толщина слоя много меньше его поперечных размеров. В этом случае выбранный вид функции тока дает удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

Предложенная методика может быть использована для натуральных измерений коэффициента Пуассона μ на достаточно тонких слоях калийной соли, находящихся в объемном напряженном состоянии, при осевой нагрузке более 60 МПа или на целиках с отношением диаметра к высоте более 5. В данном случае поведение калийной соли достаточно хорошо соответствует модели вязкой жидкости.

The selection as model for an estimation of the SDS of potassium salt located in a volumetric state of stress, at enough high level of actual stresses, model of viscous flow allows qualitatively and quantitatively to receive the simple enough description of behavior of the salt arrays, in particular, such phenomena, as convergence of a contour development in a strata of the array with the course of time.

The set up solution is fair only for small as contrasted to by width of a layer of rocks of displacement. Besides it is supposed, that the width of a layer is much less than his cross sectional dimensions. The in this case selected kind of a flow function gives satisfactory concurrence with experimental data.

The offered technique can be utilized for natural measurements of Poisson's constant μ on enough laminas of potassium salt located in a volumetric state of stress, under conditions of an axle-load more than 60 MPa, or on pillars with attitude of diameter to an altitude more than 5. In this case behaviour of potassium salt well enough corresponds to model of viscous liquid.

Выбор в качестве модели для оценки напряженно-деформированного состояния калийной соли, находящейся в объемном напряженном состоянии при достаточно высоком уровне действующих напряжений, модели течения вязкой жидкости позволяет достаточно просто качественно и количественно описать поведение соляных массивов, в частности таких явлений, как затекание (конвергенция контура) выработки в толще массива с течением времени.

Математически такой подход эквивалентен переходу от модели изотропного несжимаемого упругого материала к модели вязкого течения, описываемого следующей системой уравнений для компонентов скорости, [1]:

$$\begin{aligned} &\sigma_x - \sigma_0 = 2\mu\dot{e}_x;\ \tau_{yz} = \mu\dot{\gamma}_{yz};\\ &\sigma_x - \sigma_0 = 2\mu\dot{e}_y;\ \tau_{zx} = \mu\dot{\gamma}_{zx};\\ &\sigma_x - \sigma_0 = 2\mu\dot{e}_z;\ \ \tau_{xy} = \mu\dot{\gamma}_{xy}, \end{aligned} \qquad (1)$$

где $\dot{e}_x$, $\dot{e}_y$, ..., $\dot{\gamma}_{yz}$ – компоненты малой скорости вязких деформаций; μ – коэффициент

динамической вязкости; σ_x, σ_y, σ_z, τ_{xz}, τ_{xy}, τ_{yz} – компоненты тензора напряжений; σ_0 – прочность при одноосном сжатии.

Уравнения (1) справедливы, когда можно пренебречь упругими деформациями по сравнению с вязкими, хотя и последние остаются достаточно малыми. При этом принимается, что справедлив закон Ньютона для вязких жидкостей:

$$\tau = \mu\dot{\gamma}, \qquad (2)$$

где $\dot{\gamma}$ – скорость остаточного относительного сдвига.

Если скорость течения жидкости очень мала, можно считать, что напряжения находятся в статическом равновесии, и динамическими эффектами можно пренебречь.

Считая изменение объема $e_0 = 0$, получим уравнение для скоростей деформаций, идентичное уравнению неразрывности течения вязкой жидкости,

$$\dot{e}_0 = \dot{e}_x + \dot{e}_y + \dot{e}_z = 0. \qquad (3)$$

Из соотношений (1)-(3) можно сформулировать критерии, позволяющие идентифицировать принадлежность исследуемого материала к классу, описываемому моделью вязкой жидкости:

- поведение материала под нагрузкой описывается системой (1);
- коэффициент Пуассона $\nu \approx 0{,}5$;
- объемное разрыхление $e_0 = 0$.

При этом допускается поведение материала как неньютоновской жидкости, что эквивалентно появлению зависимости μ от времени.

Для изучения характера изменения коэффициента μ для калийной соли воспользуемся решением А.Надаи [3] о сжатии тонкого слоя вязкой жидкости между двумя плоскостями. Для этого необходимо найти решение симметричной задачи для уравнения

$$\nabla_1^2 \Psi = 0 \qquad (4)$$

при следующих граничных условиях:

$z = h;\ \upsilon = -\upsilon_0 = \text{const};\ z = -h;\ \upsilon = \upsilon_0 = \text{const},$

где ψ – функция тока; υ_0 – скорость течения вблизи кровли и почвы слоя; υ – осевой компонент скорости; z – координата по высоте; h – половина толщины слоя.

Решение уравнения (4) получено в виде полинома

$$\psi = C_1 r^2 z + C_2 r^2 z^3,$$

откуда следуют выражения для упругих напряжений:

$$\sigma_r = \sigma_t = \frac{3\mu\upsilon_0}{4h^3}\left(r^2 - a^2 - hz^2 + 2h^2\right);$$

$$\sigma_z = \frac{3\mu\upsilon_0}{4h^3}\left(r^2 - a^2 - 2z^2 - 4h^2\right); \qquad (5)$$

$$\tau_{rz} = -\frac{3\mu\upsilon_0}{2h^3}rz; \quad p = -\frac{1}{3}\left(\sigma_z + \sigma_t + \sigma_r\right),$$

где p – усредненное полное напряжение в средней плоскости массива; a – максимальный радиус цилиндрического вязкого слоя; σ_τ и σ_z – радиальное и осевое нормальное напряжение соответственно; τ_{rz} – касательное напряжение в радиальной плоскости.

Выражения (5) выведены из условия что $p = 0$ в точке с координатами $r = a$, $z = 0$. Это позволяет найти распределение давления в средней плоскости:

$$p = p_{\max}\left(1 - \frac{r^2}{a^2}\right).$$

Тогда полная осевая нагрузка, необходимая для сдавливания цилиндрического вязкого слоя,

$$P = \frac{3\pi\mu\upsilon_0 a^4}{8h^3}.$$

Учитывая условия несжимаемости материала слоя $ha^2 = h_0 a_0^2$, где a_0 и h_0 – значения a и h при $t = 0$, можно получить соотношение, связывающее μ с нагрузкой P:

$$\mu = \frac{8}{3}\sigma\frac{h^4}{h_0 a_0^2 \upsilon_0} = \frac{8}{3}\sigma h_0^3 \frac{\left(1 - e_z\right)}{\frac{de_z}{dt}}, \qquad (6)$$

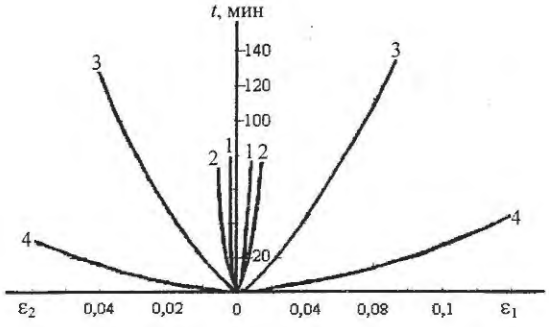


Рис.1. Зависимости осевой и поперечной деформаций от времени при различных уровнях осевого давления

1, 2, 3 и 4 – при σ, равном 30, 40, 60 и 80 МПа соответственно

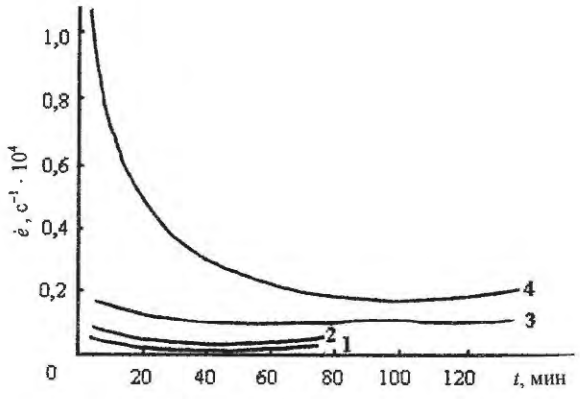


Рис.2. Зависимость скорости осевой деформации от времени (см. рис.1)

где $\sigma = P/\pi a^2$ – среднее напряжение, приложенное к цилиндрическому слою; e_z – деформация в направлении оси z; t – время.

Это решение справедливо только для малых по сравнению с толщиной слоя смещений. Кроме того, предполагается, что толщина слоя много меньше его поперечных размеров. В этом случае выбранный вид функции тока дает удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

Таким образом, формула (6) дает возможность определить значение коэффициента динамической вязкости на основе экспериментальных данных при следующем режиме испытаний: тонкий диск из исследуемого материала подвергается сжатию при σ = const; в ходе эксперимента измеряется значение компонента скорости вдоль оси образца как функции времени и по формуле (6) вычисляется μ. Если материал слоя в ходе эксперимента меняет свои свойства, что приводит к появлению зависимости μ от времени, то скорость $\frac{de_z}{dt}$ и соответственно μ определяется для выбранных моментов времени.

В ходе экспериментов изучались образцы калийной соли Старобинского месторождения, выполненные в виде дисков диаметром 30 мм и толщиной 6-8 мм [2]. Толщина дисков выбиралась так, чтобы средний размер зерен не превышал ее. Испытания проводились на универсальной установке жесткого нагружения БУ-58 конструкции ВНИМИ.

В результате экспериментов получены графики изменения продольной и радиальной составляющих деформаций в зависимости от времени (рис.1). Дифференцируя их, получим кривые скоростей деформации (рис.2.). Анализируя графики изменения деформаций и скоростей деформаций от времени, увидим, что наибольшие изменения приходятся на начальный участок времени ($t = 0 \div 60$ мин). Здесь скорости изменяются примерно в 2 раза при $\sigma = 60$ МПа и в 5 раз при $\sigma = 80$ МПа. При $t > 60$ мин кривая скорости практически постоянна и зависит только от уровня приложенной нагрузки, поэтому длительность испытания в данном цикле исследований была ограничена 3 ч.

Значение мгновенного коэффициента динамической вязкости вычислялось в соответствии с изложенной выше методикой при различных уровнях нагрузки в диапазоне времени 0-120 мин (рис.3). Из них видно, что при больших нагрузках $\mu(t)$ приближается к прямой линии, мало изменяясь во времени. Лишь сразу после приложения нагрузки ($t = 0 \div 20$ мин) наблюдается рост значений коэффициента динамической вязкости от близкого к нулю до установившегося уровня при $t > 20$ мин.

При увеличении нагрузки снижается значение μ. При изменении σ от 60 до 80 МПа величина μ уменьшается приблизительно в 3 раза. Можно отметить, что при дальнейшем увеличении σ диапазон изме-

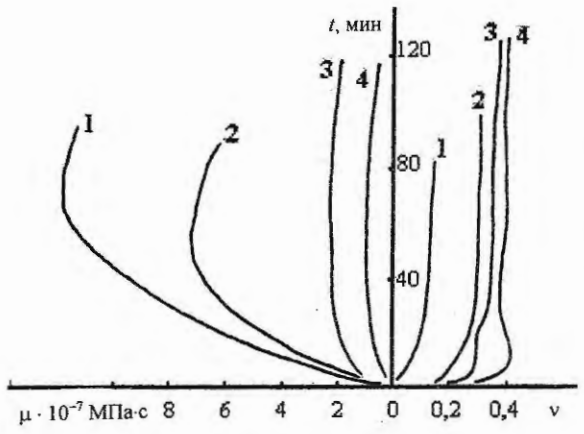


Рис.3. Зависимость коэффициента динамической вязкости μ и коэффициента поперечной деформации ν от времени при различных уровнях осевого давления (см. рис.1.)

нения μ уменьшается, постоянно стабилизируясь. При достаточно малом уровне осевой нагрузки (30-40 МПа) μ резко возрастает, причем интервал времени, в течение которого наблюдается этот рост, увеличивается до 60 мин. Эти аномально высокие значения коэффициента динамической вязкости заставляют высказать предположения о существенных структурных изменениях в материале образца при повышении осевого давления. При $\sigma = 30$ МПа $\mu = 1{,}07 \cdot 10^7$ МПа·с.

Для более детальной характеристики механизма деформирования материала образцов с целью выяснения соответствует ли он модели вязкой жидкости, были исследованы зависимости коэффициента Пуассона ν и объемного разрыхления $\Delta\theta$ от времени и уровня нагрузки. Согласно условиям несжимаемости $(e_0 = 0)$ и уравнениям неразрывности, которым должна удовлетворять вязкая ньютоновская жидкость, коэффициент Пуассона для нее должен быть равен 0,5, изменение объема должно равняться нулю. Сумма скоростей также должна быть равной нулю $(\dot{e}_0 = 0)$.

Из приведенных зависимостей можно сделать вывод, что этим условиям материал удовлетворяет лишь при давлениях около 60 МПа: при $\sigma = 60$ МПа на участке стабилизации $\nu = 0{,}44$, при $\sigma = 80$ МПа $\nu = 0{,}47$. При меньших давлениях его значение становится существенно меньше, приближаясь к упругому пределу. Наблюдавшиеся изменения объема также свидетельствуют о достаточном соответствии поведения калийной соли при высоких давлениях модели вязкой жидкости.

Выводы

1. Поведение тонких слоев калийной соли, находящейся в объемном напряженном состоянии при осевой нагрузке более 60 МПа, достаточно хорошо соответствует модели вязкой жидкости с коэффициентом динамической вязкости $\mu = (0{,}005 \div 0{,}17) \times \times 10^7$ МПа·с.

2. При давлениях 30-60 МПа можно говорить о квазижидкостной модели для калийной соли. При этом значение μ существенно зависит от уровня нагрузки, а коэффициент Пуассона отличается от 0,5.

3. Указанные выводы справедливы только для объемного напряженного состояния. При испытаниях образцов в одноосном напряженном состоянии или при малых (менее 30 МПа) боковых давлениях наблюдается разрыхление материала образца, а значения коэффициента поперечной деформации составляют величину, большую 0,6, при гидравлическом давлении 10 МПа и менее.

4. Изложенная методика может быть использована для измерений коэффициента μ на достаточно тонких слоях калийной соли или на целиках с отношением диаметра к высоте более 5.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Галин Л.А.* Упругопластические задачи. М.: Наука, 1984.

2. *Зарецкий-Феоктистов Г.Г.* Определение реологических характеристик образцов калийной соли, подкрепленных жесткими кольцами / Г.Г.Зарецкий-Феоктистов, А.Г.Лопушняк, В.П.Терещенко // Технология подземной разработки калийных месторождений / Пермский политехнический ин-т. Пермь, 1988.

3. *Надаи А.* Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Иностранная литература, 1964.

Научный руководитель д.т.н. проф. *Л.К.Горшков*