

УДК 622.363.2

В.А. Асанов, И.Л. Паньков

ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ СОЛЯНЫХ ПОРОД ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ *

Приведены результаты испытаний на ползучесть соляных пород Верхнекамского месторождения калийных солей.

Ключевые слова: безопасность горных работ, калийные рудники, ползучесть, уровни нагружения.

Семинар № 3

Обеспечение безопасности горных работ на калийных рудниках неразрывно связано с учетом влияния фактора времени на устойчивость конструктивных элементов камерной системы разработки и долговременную сохранность водозащитной толщи. В этой связи задача изучения реологических свойств соляных пород, является важной и актуальной для практики геомеханического обеспечения защиты калийных рудников от затопления.

Прямые испытания на ползучесть выполнялись на соляных породах Верхнекамского месторождения калийных солей (каменная соль, красный сильвинит, карналлит). Эксперименты проводились в режиме одноосного сжатия при постоянном усилии задаваемом гидравлическими нагрузочными устройствами.

Испытания проводились на цилиндрических образцах каменной соли и красного сильвинита (диаметр – 42 мм, высота – 84 мм) и кубических образцах карналлита (размер стороны – 70 мм). Нагрузка на образец прикладывалась перпендикулярно естест-

венной слоистости. Продольные и поперечные деформации измерялись индикаторами часового типа с точностью 0,01 мм. Для обоснования выбора уровней нагружения при длительных исследованиях предварительно проводились испытания образцов на одноосное сжатие при условно-мгновенном режиме. Эксперименты выполнялись на жестком испытательном оборудовании при стандартной скорости деформирования 1 мм/мин. Среднее значение мгновенного предела прочности ($\sigma_{пр}$) составляло: каменная соль – 23 МПа; красный сильвинит – 22 МПа, карналлит – 17 МПа.

Характерные кривые ползучести приведены на рис. 1.

Анализ результатов экспериментов показал, что стадия затухающей ползучести фиксировалась при следующих уровнях нагружения: каменная соль – 0,6 $\sigma_{пр}$ (см. рис. 1, а, кривая 1); сильвинит – 0,4 $\sigma_{пр}$ (см. рис. 1, б, кривая 1) и карналлит – 0,2 $\sigma_{пр}$ (см. рис. 1, в, кривая 1).

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 07-05-96019 р_урал_а) и Интеграционного проекта УрО РАН № 05-11-04.

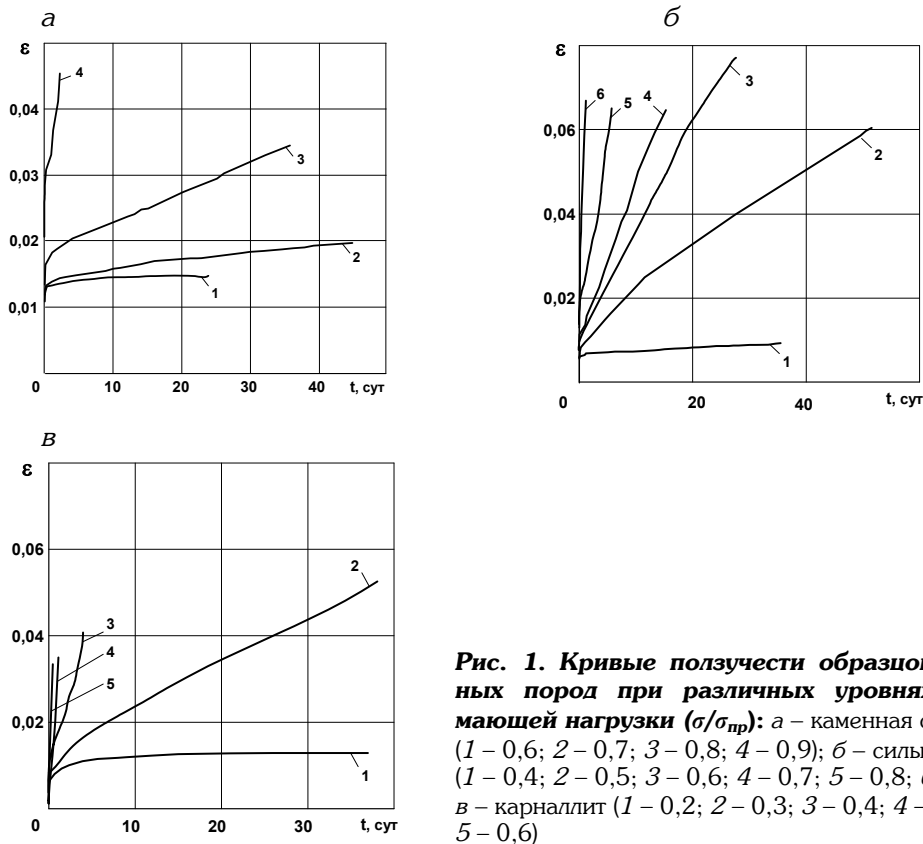


Рис. 1. Кривые ползучести образцов соляных пород при различных уровнях сжимающей нагрузки ($\sigma/\sigma_{пр}$): а – каменная соль (1 – 0,6; 2 – 0,7; 3 – 0,8; 4 – 0,9); б – сильвинит (1 – 0,4; 2 – 0,5; 3 – 0,6; 4 – 0,7; 5 – 0,8; 6 – 0,9); в – карналлит (1 – 0,2; 2 – 0,3; 3 – 0,4; 4 – 0,5; 5 – 0,6)

Стадия установившейся ползучести, характеризующейся постоянной скоростью деформирования, наблюдалась при уровнях нагрузки: каменная соль – 0,7 $\sigma_{пр}$ и 0,8 $\sigma_{пр}$ (см. рис. 1, а, кривые 2 и 3); сильвинит – 0,5 $\sigma_{пр}$ (см. рис. 1, б, кривая 2); карналлит – 0,3 $\sigma_{пр}$ (см. рис. 1, в, кривая 2). Несмотря на то, что в процессе исследований наблюдалось постоянное увеличение деформаций ползучести, продолжительность эксперимента (приблизительно 40 суток) оказалось недостаточной для полного разрушения образцов. Отметим, что по завершению эксперимента, величина деформаций ползучести была сопоставима с деформациями, при которых происходит разрушение образца в режиме условно-мгновенного нагружения.

Характерной особенностью деформирования соляных образцов является быстрая реализация установившейся ползучести с постепенным переходом на стадию прогрессирующей ползучести: каменная соль – 0,9 $\sigma_{пр}$ (см. рис. 1, а, кривая 4); сильвинит – 0,6 $\sigma_{пр}$; 0,7 $\sigma_{пр}$; 0,8 $\sigma_{пр}$; 0,9 $\sigma_{пр}$ (см. рис. 1, б, кривые 3, 4, 5, 6); карналлит – 0,4 $\sigma_{пр}$; 0,5 $\sigma_{пр}$; 0,6 $\sigma_{пр}$ (см. рис. 1, в, кривые 3, 4, 5). Однако, даже на этой стадии в процессе эксперимента не всегда фиксировалось полное разрушение образцов. В этой связи считалось, что разрушение (реализация прогрессирующей ползучести) происходит при достижении деформации образца, соответствующей пределу остаточной прочности при условно-мгновенных испытаниях. Та-

кой подход согласуется с механизмом разрушения пород в условиях прогрессирующей ползучести и на стадии разупрочнения при мгновенных испытаниях, который в обоих случаях имеют близкую физическую природу.

По результатам прямых испытаний на ползучесть и теоретической оценки времени разрушения, построены графики длительной прочности, асимптота которых характеризует величину предела длительной прочности (σ^∞). Для испытанных серий образцов данный параметр находится в интервале: каменная соль – $(0,60 \div 0,65) \sigma_{пр}$; сильвинит – $(0,35 \div 0,40) \sigma_{пр}$; карналлит – $(0,2 \div 0,25) \sigma_{пр}$.

Исследование влияния уровня нагружения на изменение скорости продольной деформации, соответствующей установившейся ползучести показало, что в полулогарифмической системе координат результаты достаточно хорошо описываются линейными зависимостями (рис. 2). Для испытанных литологических разновидностей соляных пород наибольшая «реологическая активность» присуща карналлиту, скорость деформирования которого при одинаковом уровне нагрузки на несколько порядков превышает аналогичный показатель сильвинита и каменной соли.

Несмотря на то, что определение реологических свойств горных пород прямыми методами, обеспечивает получение наиболее достоверных результатов, значительная продолжительность экспериментов (от нескольких недель до нескольких месяцев) ограничивает возможность массовых испытаний. В этой связи, при геомеханических исследованиях часто используют ускоренные или упрощенные методы определения реологических показателей горных пород, в частности

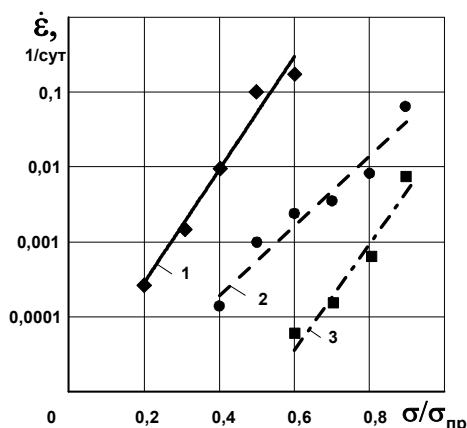


Рис. 2. Изменение скорости деформирования (стадия установившейся ползучести) соляных пород в зависимости от уровня сжимающих нагрузок: 1 – карналлит; 2 – сильвинит; 3 – каменная соль

одного из них – предела длительной прочности.

Для сокращения времени реологических испытаний нами использована усовершенствованная модификация ползуче-релаксационного метода С.С. Вялова [1, 2, 3] заключающаяся в экспериментальном нахождении максимума длительной диаграммы.

Предложенная схема ускоренных испытаний, учитывала возможность современного прессового оборудования (электромеханический пресс Zwick/Roel-250, предельная нагрузка – 250 кН, точность измерений $\approx 2 \div 5$ Н), поддерживающего ползуче-релаксационный режим деформирования, что позволяло наряду с условно-мгновенной кривой деформирования получать диаграмму длительного нагружения образца.

Схема к определению предела длительной прочности приведена на рис. 3. Образец нагружался до точки А, составляющей, в зависимости от степени хрупкости породы, величину от $0,5 \sigma_{пр}$ до $0,9 \sigma_{пр}$.

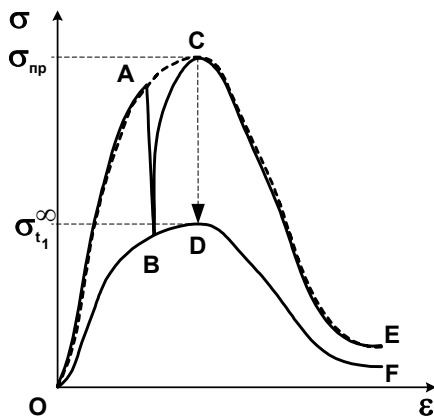


Рис. 3. Определение предела длительной прочности при ползуче-релаксационном режиме

Затем производился перевод нагружающего устройства в автоматический ползуче-релаксационный режим, при котором происходило поддержание постоянной суммарной деформации образца и пресса. После определения базовой точки В, характеризующей относительную стабилизацию процесса релаксации, наступающей через десять-двадцать часов после начала эксперимента, производилось повторное нагружение образца до достижения предела мгновенной прочности (точка С). Эта стадия соответствует кривой ВС (рис. 3). Далее образец доводился до разрушения (запредельная стадия деформирования, показана кривой СЕ).

Нахождение предела длительной прочности осуществлялось графически путем проведения кривой, огибающей точки О, А, С и Е, которая достаточно точно отражала условно-мгновенную диаграмму деформирования образца (см. рис. 3). Аналог диаграммы длительного нагружения строился путем пропорционального сжатия кривой ОАСЕ по оси ординат

до ее совпадения с точкой В (кривая ОВДФ на рис. 3). В работе [4] отмечено, что в случае полной релаксации напряжений точка D графика длительного нагружения соответствует пределу длительной прочности.

В реальных условиях эксперимент, как правило, продолжается от нескольких часов до одних суток. За это время полная релаксация напряжений не достигается. В этой связи для определения «истинной» величины предела длительной прочности необходима экстраполяция полученных результатов на условно «бесконечное время релаксации». Для осуществления данной процедуры связь между напряжением релаксации образца за время эксперимента и соответствующим напряжением релаксации за время равное бесконечности представляли в виде зависимости:

$$\sigma_{пр} - \sigma^{\infty} = \frac{\sigma_{пр} - \sigma_{t_1}^{\infty}}{K_{t_1}^{корр}}, \quad (1)$$

где $\sigma_{пр}$ – условно-мгновенный предел прочности; σ^{∞} – «истинный» предел длительной прочности; $\sigma_{t_1}^{\infty}$ – предел длительной прочности, определенный по ускоренной методике за конечное время t_1 , соответствующее продолжительности эксперимента; $K_{t_1}^{корр} = f(t_1)$ – корректирующая функция ($0 \leq K_{t_1}^{корр} \leq 1$).

Для удобства использования выражение (1) преобразуем к виду

$$k_t^{\infty} = 1 - \frac{1}{K_{t_1}^{корр}} \cdot [1 - k_t^1], \quad (2)$$

где $k_t^{\infty} = \frac{\sigma^{\infty}}{\sigma_{пр}}$ – «истинный» коэффициент длительной прочности;

$k_t^1 = \frac{\sigma_{t_1}^{\infty}}{\sigma_{пр}}$ – коэффициент длительной прочности, рассчитанный по ускорен-

ной методике за время эксперимента t_1 .

Результаты определения коэффициента

длительной прочности соляных пород прямым и ускоренным методом

Порода	Прямой метод		Ускоренный метод	
	Кол-во образцов	$\frac{\sigma^\infty}{\sigma_{пр}}$	Кол-во образцов	$\frac{\sigma^\infty}{\sigma_{пр}}$
Карналлит	15	0,20 ÷ 0,25	5	0,23
Каменная соль	12	0,60 ÷ 0,65	7	0,65
Сильвинит	18	0,35 ÷ 0,40	5	0,36

Определение вида корректирующей функции проводилось на основании результатов экспериментов по длительной релаксации образцов каменной соли и сильвинита, продолжающихся в течение трех - четырех суток. За это время изменение напряжений было сопоставимо с точностью их измерений на используемом оборудовании, что говорило о практически полной релаксации напряжений.

По результатам проведенных исследований в качестве корректирующей функции принято выражение вида:

$$K_{t_1}^{корр} = (1 - \exp(-a \cdot t_1))^n, \quad (3)$$

где a и n – параметры корректирующей функции.

Для соляных образцов определены следующие значения параметров корректирующей функции (3):

$$a = 0,628 \text{ сут}^{-1}, n = 0,122.$$

Результаты сопоставительного определения коэффициента длительной прочности соляных пород (карналлита, каменной соли и сильвинита) прямым и ускоренным методом приведены в табл. 1.

Проведенный анализ показал достаточно хорошую сходимость результатов прямых и ускоренных испытаний, что позволяет использовать предложенную методику для оперативной оценки коэффициента длительной прочности квазипластичных соляных пород.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 161133 СССР. Способ определения длительной прочности мерзлых грунтов и т.п. пластично-вязких материалов / С.С. Вялов (СССР). – Опубл. в Б. И. – 1964. - № 6.

2. Бублик Ф.П., Иванов Г.А. Исследование длительной прочности и ползучести неоднородных целиков//Труды ВНИМИ. – Л., 1970. – Сб. 78.

3. Пушкарев В.И., Афанасьев Б.Г. Ускоренный метод определения предела длительной прочности слабых горных пород. – ФТПРПИ, 1973. – № 5.

4. Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В., Фадеев А.Б. Прочность и деформируемость горных пород. – М.: Недра, 1979. – 269 с. **ИДБ**

Коротко об авторах

Асанов В.А. – доктор технических наук, профессор кафедры Физических процессов горного и нефтегазового производства,

Паньков И.Л. – кандидат технических наук, доцент кафедры Физических процессов горного и нефтегазового производства, Пермский государственный университет, ava@mi-perm.ru

