УДК 622.831

Деформирование соляных пород при объемном многоступенчатом нагружении

И.Л.ПАНЬКОВ¹, И.А.МОРОЗОВ²✉¹ Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия² Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Представлено экспериментальное обоснование возможности применения метода объемного многоступенчатого нагружения для исследования процесса деформирования соляных пород в лабораторных условиях. Приведены результаты сопоставительных исследований объемного многоступенчатого и одноступенчатого нагружения образцов соляных пород. Представлены результаты исследования влияния уровня бокового давления на значения предела прочности и предела остаточной прочности сильвинита, определенные одноступенчатым и многоступенчатым методами. Представлены результаты исследования влияния уровня бокового давления на предел дилатансии каменной соли. Проанализировано влияние метода нагружения на значения параметров паспорта прочности Кулона – Мора сильвинита. Проанализировано изменение модуля упругости в процессе деформирования соляных пород в зависимости от уровня бокового давления.

Показано, что метод многоступенчатого нагружения адекватно отражает процессы деформирования и разрушения соляных пород и позволяет не только уменьшить влияние неоднородностей внутреннего строения образцов на результаты экспериментальных данных, но также существенно снизить необходимый объем породного материала.

Ключевые слова: соляные породы; объемное нагружение; многоступенчатый метод; модуль упругости; предел прочности; остаточная прочность; предел дилатансии

Как цитировать эту статью: Паньков И.Л. Деформирование соляных пород при объемном многоступенчатом нагружении / И.Л.Паньков, И.А.Морозов // Записки Горного института. 2019. Т. 239. С. 510-519. DOI 10.31897/PMI.2019.5.510

Введение. В последние десятилетия отмечается неуклонный рост добычи различных видов полезных ископаемых. Это достигается за счет как увеличения производительности действующих рудников, так и строительства новых предприятий. Осваиваемые участки, как правило, характеризуются сложными горно-геологическими и гидрогеологическими условиями, что обуславливает увеличение риска техногенных аварий. Несмотря на соблюдение всех требований нормативных документов, с течением времени зачастую наблюдаются интенсивное деформирование конура горных выработок, разрушение грузонесущих элементов системы разработки. Эти явления сопровождаются интенсификацией процессов сдвижения налегающих пород, что в конечном итоге может привести к нарушению технологического процесса добычи полезных ископаемых и аварийным ситуациям [17]. Поскольку горнодобывающее производство относится к наиболее сложным и опасным видам человеческой деятельности, эффективность его функционирования во многом определяется качеством информационного обеспечения горных работ. Это особенно актуально для месторождений водорастворимых руд, таких как Верхнекамское месторождение калийных солей, горно-геологические и горнотехнические условия отработки которого характеризуются большой сложностью и разнообразием, а его разработка сопряжена с опасностью катастрофического затопления рудников при прорыве поверхностных вод в подземные горные выработки.

Мировой опыт разработки соляных месторождений, по данным Б.В.Лаптева [5], насчитывает свыше 80 затопленных и не подлежащих восстановлению рудников. В работе [4] автором дается подробное описание аварий, произошедших на двух рудниках Верхнекамского калийного месторождения. В июле 1986 г. в результате прорыва рассолов в горные выработки один из рудников месторождения был затоплен. Количество рассолов, поступивших в горные выработки, составило около 15 млн м³. На земной поверхности над местом прорыва вод образовался провал длиной от 60 до 80 м и шириной от 40 до 50 м. В октябре 2006 г. произошел прорыв рассолов в горные выработки другого рудника. Спасти его от затопления не удалось. На месте прорыва рассолов в июле 2007 г. на земной поверхности образовался провал шириной 55 м и длиной 80 м. Авторами работ [11, 12] ведутся исследования проблем, вызванных затоплением калийных руд-

ников на территории Верхнекамского калийного месторождения. Непрерывные процессы, связанные с растворением солей в затопленных рудниках, оседанием земной поверхности, ростом старых и образованием новых провалов, требуют пристального внимания специалистов в области геомеханики и наносят непоправимый вред промышленным и гражданским зданиям и сооружениям, окружающей среде.

Характер деформирования и разрушения конструктивных элементов подземных сооружений зависит от множества факторов: геометрических размеров и формы выработок, особенностей строения и свойств пород, их поведения под нагрузкой и т.д. Для снижения степени опасности возникновения аварийных ситуаций необходима гибкая система геомеханического контроля безопасности горных работ, которая бы адекватно отражала разнообразие процессов, происходящих в массиве, и позволяла оперативно учитывать локальные изменения горно-геологических и горнотехнических условий при принятии управленческих решений. Такая система должна оценивать изменение как механических характеристик пород приконтурного массива, так и его напряженного состояния в процессе ведения горных работ.

В настоящее время накоплен большой опыт решения различных задач обеспечения устойчивости элементов подземных конструкций. Для анализа геомеханических процессов, происходящих в подработанном соляном массиве, авторы работ [10-12] широко используют методы механики горных пород. Однако, несмотря на усложнение математических постановок задач, точность их оценок зависит от достоверности параметрического обеспечения расчетов и адекватности геомеханических моделей, описывающих процесс изменения напряженно-деформированного состояния породного массива, междокамерных целиков, кровли очистных камер. Это обуславливает необходимость экспериментального изучения характера деформирования и разрушения горных пород в лабораторных условиях при различных схемах нагружения, соответствующих напряженному состоянию краевых частей горного массива.

Лабораторные исследования механических свойств горных пород включают довольно большой объем различных видов испытаний: исследования плотностных свойств, характера деформирования и разрушения при мгновенных и длительных нагружениях в условиях объемных и одноосных схем приложения нагрузки. Исследования предполагают испытание образцов на сжатие, растяжение, изгиб при различных значениях скорости нагружения, уровня бокового давления, температуры и т.д., что требует большого числа идентичных образцов. Зачастую изготовление необходимого количества образцов, ввиду ограниченного объема породного материала, представляет значительную сложность. В этом случае применение многоступенчатого метода объемного нагружения для исследования процесса деформирования пород в лабораторных условиях может существенно сократить необходимый объем породного материала, уменьшить вариацию значений механических характеристик, связанную с индивидуальными особенностями внутреннего строения отдельных образцов.

Данная работа посвящена сравнительному анализу результатов применения метода объемного многоступенчатого нагружения и «традиционного» (одноступенчатого) стандартного метода объемного нагружения для определения физико-механических характеристик соляных пород в лабораторных условиях. Более подробно со стандартными методами объемного нагружения можно ознакомиться, например, в ГОСТ 21153.8-88 [3] или ASTM D7012-14e1 [9].

Состояние вопроса. Впервые метод объемного многоступенчатого нагружения (Multiple Failure State Test) для определения прочностных характеристик горных пород был предложен авторами работы [16]. Основное отличие данного метода от одноступенчатого заключается в том, что при достижении осевым напряжением предельного значения (предела прочности) первой ступени нагружения боковое давление повышается до необходимого уровня следующей ступени, затем происходит увеличение осевой нагрузки до предела прочности второй ступени нагружения. Таким образом, один образец может подвергаться нагружениям нескольких ступеней. В результате испытания одного образца по многоступенчатой схеме обеспечивается возможность построения предельной огибающей прочности. Используя известные соотношения между главными и касательными напряжениями, можно перейти к координатам «касательное – нормальное напряжение», определив тем самым параметры паспорта прочности Кулона – Мора: коэффициент сцепления, угол внутреннего трения.

По данным [16], многоступенчатый метод для рассмотренных авторами горных пород: известняка и мрамора, – дает значения предела прочности, сопоставимые со значениями, полученными по одноступенчатой схеме. Последующие исследования поведения горных пород и схожих по свойствам материалов в условиях объемного нагружения свидетельствуют о том, что в ряде случаев многоступенчатый метод дает заниженные значения прочностных характеристик. В работе [24] авторы приводят результаты исследования геомеханических характеристик сланца (Marcellus Shale). Авторами отмечается, что многоступенчатый и одноступенчатый методы дают близкие значения предела прочности и модуля упругости. Указанный факт авторы объясняют относительно небольшим количеством ступеней нагружения (три ступени) многоступенчатого метода и переключением на следующий этап на первых двух ступенях, не доводя образец до предела дилатансии. На основании сравнительного анализа результатов одноступенчатых и многоступенчатых испытаний сланца (Clay Shale) авторами работы [8] был сделан вывод о том, что применение многоступенчатого метода для хрупких горных пород дает существенно заниженные значения прочностных характеристик. Причем расхождения между результатами многоступенчатых и одноступенчатых испытаний увеличиваются с возрастанием количества ступеней нагружения.

В работе [19] авторами приводятся результаты сопоставительных исследований красного песчаника. Авторы указывают, что существенные отличия между значениями прочности по данным многоступенчатых и одноступенчатых испытаний связаны с различиями в истории нагружения. Авторы работы [15] показали возможность применения многоступенчатого метода для определения прочности и модуля упругости туфа (Newberry Tuff) при различных уровнях бокового давления. Сопоставительные исследования возможности применения многоступенчатого метода для определения прочностных характеристик известняка (Edwards limestone), представленные в работе [25], свидетельствуют о том, что при переключении на следующие ступени нагружения, без доведения образца до интенсивного трещинообразования, многоступенчатый метод дает результаты, аналогичные данным одноступенчатых испытаний.

В исследовании образцов аргиллита в натурных условиях в нижней части скважины [22] сообщается о том, что из-за накопления образцами поврежденности в процессе многоступенчатого испытания прочность породы может быть существенно недооценена. В работе [23] авторами приводятся интересные исследования, выполненные с помощью многоступенчатых экспериментов на образцах больших размеров: высота 120 см, диаметр 60 см. Образцы представлены слоями аргиллита и песчаника, аргиллита и известняка. Авторы [23] указывают на пластичное поведение породы как необходимое условие, позволяющее определить предел прочности образца при многоступенчатом нагружении, не доводя образец до разрушения. В работе [14] авторами показана возможность применения многоступенчатого метода не только к горным породам, но и к нетрадиционным гранулированным материалам. В работе указано на довольно хорошее соответствие результатов многоступенчатых испытаний данным одноступенчатых тестов.

В [13] представлены результаты исследований изменения сцепления и угла трения в процессе накопления образцами глинистого мелкозернистого песчаника (argillaceous pack sand rock) поврежденности. Поврежденность в образцах создавалась с помощью многоступенчатых тестов. Результаты исследования [19] наглядно иллюстрируют, что многоступенчатый метод, при большом количестве ступеней нагружения, дает результаты, существенно отличающиеся от данных одноступенчатых испытаний. В процессе многоступенчатого испытания при переключении на следующую ступень нагружения гораздо раньше или после достижения предела прочности образца его прочностные характеристики могут существенно отличаться от данных одноступенчатых испытаний [21]. Из вышеизложенного следует, что на сегодняшний день нет однозначного мнения о возможности применения многоступенчатого метода для исследования поведения породных образцов в режиме объемного нагружения.

Наши предыдущие исследования возможности применения метода объемного многоступенчатого нагружения для определения прочностных характеристик соляных пород [6] показали, что, по сравнению с одноступенчатым, многоступенчатый метод, реализуемый по схеме авторов работы [16], дает заниженные значения прочностных характеристик. Указанный факт, вероятно, связан с накоплением повреждений образцом в процессе многоступенчатого испытания. Анализ характера процесса квазипластичного деформирования соляных пород в ходе объемного нагружения по данным работ [1, 2, 6, 7] позволяет сделать вывод о необходимости переключения на

следующую ступень деформирования в ходе многоступенчатого нагружения, не доводя образец до предела прочности. Для исключения преждевременной потери образцом своей несущей способности в работах [15, 21, 24] предлагается выполнять переключение на следующий этап многоступенчатого нагружения при достижении образцом предела дилатансии. Здесь и далее под пределом дилатансии будем понимать уровень осевого напряжения, при котором объем образца, ввиду уплотнения в процессе деформирования, достигает своего минимального значения. Продолжение нагружения образца за пределом дилатансии приводит к накоплению повреждений и разуплотнению образца вследствие разрыва связей между структурными составляющими породы.

Экспериментальная часть. В данной работе было рассмотрено два возможных способа переключения на следующую ступень объемного многоступенчатого нагружения: 1) на пределе дилатансии; 2) на уровне примерно 0,9 предела прочности соответствующей ступени нагружения.

Исследование влияния уровня бокового давления на предел дилатансии соляных пород. Для исследования возможности переключения на следующую ступень объемного многоступенчатого нагружения на пределе дилатансии было изготовлено 12 цилиндрических образцов (высота 86 мм, диаметр 43 мм), выбуренных без использования промывочной жидкости из монолита каменной соли Верхнекамского месторождения калийных солей. Для исключения влияния влажности на результаты исследования перед проведением экспериментов все образцы выдерживали в сушильном шкафу до достижения постоянной массы. Лабораторные исследования выполняли по одноступенчатой схеме на испытательном комплексе MTS 815 при следующих уровнях бокового давления: 1; 4 и 10 МПа.

Порядок проведения эксперимента:

1) образец упаковывался в эластичную манжету и помещался в камеру объемного нагружения;

2) устанавливались датчики продольной и поперечной деформации соответственно MTS 632.90F-04 и MTS 632.92H-03;

3) после заполнения камеры объемного нагружения маслом гидростатическое давление повышалось до 1; 4 или 10 МПа;

4) образец выдерживался при заданном уровне гидростатического давления до достижения системой «образец – испытательная машина» состояния равновесия;

5) образец нагружали с постоянной скоростью продольного деформирования $5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$;

6) эксперимент завершался после получения участка устойчивого спада запредельной части диаграммы «продольное напряжение σ_1 – продольная деформация ε_1 » образца (рис.1).

Были проведены исследования влияния уровня бокового давления ($\sigma_2 = \sigma_3$) на предел дилатансии каменной соли Верхнекамского калийного месторождения (рис.2). Каждая точка на графике получена по результатам испытания четырех образцов.

Рис.1. Диаграмма деформирования одного из образцов, испытанного при боковом давлении 4 МПа

σ_1^{dil} – предел дилатансии, $\theta = 0,008$ – соответствующая объемная деформация образца

Рис.2. Влияние уровня бокового давления на предел дилатансии каменной соли

$\sigma_1^{\text{dil}} / \sigma_1^{\text{str}}$ – отношение предела дилатансии к пределу прочности образца

Рис.3. Фотография монолита полосчатого сильвинита (а) и вид образцов (б)

Рис.4. Зависимости продольных напряжений от относительных продольных деформаций, полученные по результатам одноступенчатых испытаний образцов сильвинита при разных значениях бокового давления

По данным рис.2 видно, что предел дилатансии каменной соли при боковом давлении порядка 5 МПа не превосходит 0,6 предела прочности. Небольшая величина относительно предела дилатансии ($\sigma_1^{\text{dil}} / \sigma_1^{\text{str}}$) при малых уровнях бокового давления не позволяет прогнозировать предел прочности каменной соли Верхнекамского калийного месторождения на первых этапах многоступенчатого нагружения. Необходимо отметить, что полученная величина относительного предела дилатансии каменной соли хорошо согласуется с данными работы [7]. Авторы [7] связывают существование предела дилатансии у горных пород со структурными изменениями, происходящими внутри образца в процессе нагружения. До предела дилатансии происходит частичное закрытие трещинно-порового пространства образца. При превышении продольными напряжениями предела дилатансии в породе происходит повторное раскрытие ранее сомкнувшихся трещин и (или) образование новых. Небольшое значение относительного предела дилатансии соляных пород объясняется очень низкой их пористостью и практически полным отсутствием межзерновой трещиноватости. По данным работы [18], пористость соляных пород составляет 0,5-1 %, а в отдельных случаях может быть менее 0,1 %. Низкая естественная трещиноватость соляных пород отложений авторами работы [20] связывается со склонностью соляных пород к залечиванию трещин в процессе ползучести.

Многоступенчатые испытания соляных пород. Для исследования деформирования соляных пород при объемном многоступенчатом нагружении на 4-м Березниковском калийном руднике Верхнекамского калийного месторождения был отобран блок полосчатого сильвинита размером 400 × 400 × 400 мм (рис.3, а), из которого изготовлена партия призматических образцов размеров 35 × 35 × 70 мм. Образцы изготавливали на отрезном станке с алмазным диском без промывочной жидкости. Использование в данной части исследования образцов призматической формы связано с существенными сложностями, с которыми мы столкнулись при попытках выбуривания цилиндрических образцов из породных блоков полосчатого сильвинита.

Всего было испытано 26 образцов (рис.3, б), в том числе 21 образец – по одноступенчатой схеме, 5 образцов – по многоступенчатой схеме нагружения. Исследования проводились при трех уровнях бокового давления: 2; 4 и 8 МПа. Перед проведением экспериментов образцы выдерживали в сушильном шкафу до достижения постоянной массы.

Одноступенчатые испытания выполнялись по схеме, аналогичной представленной в предыдущем разделе. Отличие заключалось в том, что для исследования изменения модуля упругости на различных стадиях деформирования в ходе экспериментов выполнялась серия разгрузок с последующим нагружением. Модуль упругости определялся по тангенсу угла наклона линейной части разгрузочной ветви диаграммы «продольное напряжение – относительная продольная деформация образца». По результатам одноступенчатых испытаний также определялись предел прочности σ_1^{str} и остаточная прочность σ_1^{res} образцов полосчатого сильвинита (рис.4).

Рис.5. Зависимость «продольные напряжения – относительные продольные деформации», полученная по результатам испытания одного из образцов по «модифицированной» многоступенчатой схеме нагружения

Принципиальное отличие используемой схемы многоступенчатого нагружения от применяемых авторами [6, 16, 19, 22, 29] заключается в том, что переключение на следующую ступень нагружения в наших экспериментах выполнялось на уровне нагрузки, составляющей примерно 0,9 предела прочности ($0,9 \sigma_1^{\text{str}}$) соответствующей ступени нагружения. Для исследования изменения модуля упругости в процессе многоступенчатого нагружения на каждой ступени выполнялась серия разгрузок с последующим нагружением (аналогично одноступенчатым тестам). Нагружение при многоступенчатых испытаниях выполнялось с постоянной скоростью продольного деформирования $5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Предел прочности при значениях бокового давления 2 и 4 МПа определялся путем графической экстраполяции допредельной части диаграммы «продольное напряжение – относительная продольная деформация» (рис.5). После выхода образца на остаточную прочность $\sigma_1^{\text{res } 8}$ при боковом давлении 8 МПа производилось ступенчатое снижение бокового давления – выполнялось переключение на следующий этап нагружения с боковым давлением 4 МПа, скорость продольного деформирования образца сохранялась постоянной, и определялась остаточная прочность $\sigma_1^{\text{res } 4}$. Аналогично определялась остаточная прочность $\sigma_1^{\text{res } 2}$ при боковом давлении 2 МПа.

Рис.6 на качественном уровне показывает, насколько деформируется образец в результате испытания на сжатие при различных уровнях бокового давления и схемах нагружения (одноступенчатая, многоступенчатая). Образцы 1, 20, 9 были испытаны по одноступенчатой схеме, образец 6 – по многоступенчатой.

Обсуждение результатов исследований. Результаты испытаний сведены в таблицу. Анализ влияния уровня бокового давления на предел прочности образцов полосчатого силвинита свидетельствует о том, что результаты многоступенчатых испытаний аналогичны результатам одноступенчатым. Относительная погрешность определения предела прочности многоступенчатым методом относительно результатов одноступенчатого находится в пределах от 3,4 до 9,5 %. При этом отмечается выраженная тенденция роста предела прочности с увеличением бокового давления. Так, например, при повышении бокового давления от 2 до 8 МПа наблюдается увеличение предела прочности силвинита более чем в 1,5 раза. Аналогичные результаты получены и для остаточной прочности (см. таблицу). Несколько завышенные значения предела остаточной прочности ($\delta^{\text{res}} = 19,8 \%$), полученные многоступенчатым методом при боковом давлении 2 МПа, объясняются сильным деформированием образцов в ходе испытаний, что приводило к вдавливанию нагружающих пуансонов в торцы образцов (рис.6). Данная проблема может

Рис.6. Фотография образцов после испытания

быть решена путем использования пуансонов несколько больших размеров: размер ребра нагружающего пуансона должен быть на 1-2 мм больше размера соответствующего ребра образца.

Предел прочности σ_1^{str} и остаточная прочность σ_1^{res} полосчатого сильвинита, полученные по результатам одноступенчатых и многоступенчатых испытаний

Боковое давление $\sigma_2 = \sigma_3$, МПа	Одноступенчатая схема, 21 образец		Многоступенчатая схема, 5 образцов			
	σ_1^{str} , МПа	σ_1^{res} , МПа	σ_1^{str} , МПа	δ^{str} , %	σ_1^{res} , МПа	δ^{res} , %
2	$41,9 \pm 2,0$	$26,8 \pm 1,2$	$37,9 \pm 1,7$	9,5	$32,1 \pm 1,5$	19,8
4	$49,8 \pm 2,0$	$38,8 \pm 4,1$	$48,1 \pm 1,9$	3,4	$42,1 \pm 2,4$	8,5
8	$65,1 \pm 1,3$	$58,0 \pm 6,3$	$61,9 \pm 4,1$	4,9	$56,4 \pm 2,6$	2,7

Примечание. Надежность 0,9; величины δ^{str} и δ^{res} – относительная погрешность определения предела прочности и остаточной прочности многоступенчатым методом относительно результатов одноступенчатого соответственно.

По данным испытаний были определены параметры паспорта прочности Кулона – Мора полосчатого сильвинита: коэффициент сцепления C , угол внутреннего трения φ на пределе прочности, коэффициент сцепления C^{res} и угол внутреннего трения φ^{res} на пределе остаточной прочности (рис.7). Анализ полученных значений коэффициента сцепления и угла внутреннего трения для образцов полосчатого сильвинита (рис.7, а, в) свидетельствует о том, что многоступенчатый метод объемного нагружения дает значения механических показателей с учетом разброса экспериментальных данных при определении предела прочности (см. таблицу), сопоставимые с результатами одноступенчатых испытаний. Значения коэффициента сцепления и угла внутреннего трения на пределе остаточной прочности, полученные многоступенчатым методом, существенно отличаются от значений, полученных по одноступенчатой схеме (рис.7, б, г). Данный факт объясняется завышенными значениями остаточной прочности, полученными многоступенчатым методом при

Рис.7. Паспорта прочности (а, в) и остаточной прочности (б, г) полосчатого сильвинита, полученные по результатам одноступенчатых (а, б) и многоступенчатых (в, г) испытаний

боковом давлении 2 МПа (см. таблицу). Как уже упоминалось, указанная проблема может быть решена путем использования нагружающих пуансонов несколько больших размеров.

Изменение модуля упругости E полосчатого сильвинита в процессе деформирования ($\sigma_1/\sigma_1^{\text{str}}$) в зависимости от уровня бокового давления ($\sigma_2 = \sigma_3$) и типа испытания отражает рис.8. Ось абсцисс представляет процесс деформирования относительно предела прочности соответствующих образцов. Осью ординат диаграммы делятся на две части: допредельную (Pre-Peak) и запредельную (Post-Peak). Субвертикальная штрих-пунктирная линия – это условная граница между запредельным разупрочнением породы и выходом образца на остаточную прочность (Residual).

Данные одноступенчатых испытаний (рис.8) свидетельствуют о том, что с ростом бокового давления модуль упругости сильвинита на всех этапах деформирования увеличивается. При боковых давлениях 2 МПа (рис.8, а), 4 МПа (рис.8, б) в процессе деформирования наблюдается выраженная тенденция к снижению упругих характеристик. Наиболее интенсивное снижение модуля упругости при постоянном боковом давлении происходит на этапе деформирования 0,8-1,0 от предела прочности соответствующих образцов. При этом выход образцов на остаточную прочность сопровождается стремлением модуля упругости к постоянному значению, что косвенно может свидетельствовать об окончании процесса формирования материала с новой структурой [1]. Необходимо отметить, что интенсивность уменьшения модуля Юнга в процессе деформирования с увеличением бокового давления существенно снижается.

Результаты определения модуля упругости в процессе многоступенчатого нагружения аналогичны значениям, полученным в ходе одноступенчатых испытаний (рис.8). Изменения модуля упругости в ходе многоступенчатого нагружения (рис.8, б, в) аналогичны результатам одноступенчатых испытаний. Указанный факт может свидетельствовать о том, что при рассмотренных схемах нагружения в образцах происходят схожие деформационные процессы.

Рис.8. Изменение модуля упругости в процессе деформирования в зависимости от уровня бокового давления (а – 2 МПа, б – 4 МПа, в – 8 МПа) и типа испытания

«—», «+» – результаты одноступенчатых испытаний;
«---», «◇» – результаты многоступенчатых испытаний

Закключение. Исследование влияния уровня бокового давления на предел дилатансии соляных пород показало, что использовать предел дилатансии для определения предела прочности соляных пород Верхнекамского калийного месторождения при объемном многоступенчатом нагружении нецелесообразно.

Для анализа процессов деформирования соляных пород в лабораторных условиях рекомендуется использовать метод объемного многоступенчатого нагружения с переключением на следующую ступень деформирования в точке, соответствующей 0,9 от предела прочности образца. При выходе образца на остаточную прочность при максимальном уровне бокового давления целесообразно выполнять переключение на более низкий уровень бокового давления, что позволяет получать значения остаточной прочности, соответствующие текущему боковому давлению.

Выполненные исследования показали, что многоступенчатый метод объемного нагружения адекватно отражает процессы деформирования и разрушения, происходящие в образцах, и может быть использован для определения не только прочностных, но и упругих характеристик соляных пород.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барях А.А. Деформирование соляных пород / А.А.Барях, С.А.Константинова, В.А.Асанов. Екатеринбург: УрО РАН, 1996. 203 с.
2. Барях А.А. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения / А.А.Барях, В.А.Асанов, И.Л.Паньков. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. 199 с.
3. ГОСТ 21153.8-88. Породы горные. Метод определения предела прочности при объемном сжатии. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988. 17 с.
4. Лаптев Б.В. Аварийные ситуации на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей // Безопасность труда в промышленности. 2009. № 8. С. 28-31.
5. Лаптев Б.В. Историография аварий при разработке соляных месторождений // Безопасность труда в промышленности. 2011. № 12. С. 41-46.
6. Морозов И.А. Определение прочностных характеристик соляных пород по результатам объемного многоступенчатого нагружения // Стратегия и процессы освоения георесурсов. 2017. № 15. С. 142-145.
7. Alkan H. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests / H.Alkan, Y.Cinar, G.Pusch // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2007. Vol. 44. № 1. P. 108-119. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.05.003
8. Amann F. Experimental Study of Brittle Behavior of Clay Shale in Rapid Triaxial Compression / F.Amann, P.Kaiser, E.A.Button // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2012. Vol. 45. № 1. P.21-23. DOI: 10.1007/s00603-011-0195-9
9. ASTM D7012-14e1. Standard Test Methods for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens under Varying States of Stress and Temperatures. ASTM International, West Conshohocken, PA. 2014. 9 p. DOI: 10.1520/D7012-14E01
10. Baryakh A.A. Analysis of time-to-time variation of load on interchamber pillars in mines of the Upper Kama Potash Salt Deposit / A.A.Baryakh, S.Y.Lobanov, I.S.Lomakin // Journal of Mining Science. 2015. Vol. 51. № 4. P. 696-706. DOI: 10.1134/S1062739115040064
11. Baryakh A.A. Geomechanical Estimation of Deformation Intensity above the Flooded Potash Mine / A.A.Baryakh, N.A.Samodelkina // Journal of Mining Science. 2018. Vol.53. № 4. P. 630-642. DOI: 10.1134/S106273911705303X
12. Baryakh A.A. Theoretical explanation of conditions for sinkholes after emergency flooding of potash mines / A.A.Baryakh, S.Yu.Devyatkov, N.A.Samodelkina // Journal of Mining Science. 2016. Vol. 52. № 1. P. 36-45. DOI: 10.1134/S1062739116010101
13. Evolution of cohesion and friction angle during microfracture accumulation in rock / H.Q.Zhang, D.D.Tannant, H.W.Jing, S.Nunoo, S.J.Niu, S.Y.Wang. // Nat Hazards. 2015. Vol. 77. P. 497-510. DOI: 10.1007/s11069-015-1592-2
14. Ferreira S.M. Reis. Strength of Non-Traditional Granular Materials Assessed from Drained Multistage Triaxial Tests / S.M. Reis Ferreira, A.Gomes Correia, A.J.Roque // Procedia Engineering. 2016. Vol. 143. P. 67-74. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.009
15. Geomechanical characterization of Newberry Tuff / Jihoon Wang, Woodong Jung, Yawei Li, Ahmad Ghassemi // Geothermics. 2016. Vol. 63. P. 74-96. DOI: 10.1016/j.geothermics.2016.01.016
16. Kovári K. Multiple Failure State and Strain Controlled Triaxial Tests / K.Kovári, A.Tisa // Rock Mechanics. 1975. Vol. 7. № 1. P.17-33. DOI: 10.1007/BF01239232
17. Litvinenko V. Advancement of geomechanics and geodynamics at the mineral ore mining and underground space development // Geomechanics and Geodynamics of Rock Masses: Proceedings of the 2018 European Rock Mechanics Symposium. EUROCK 2018 (Saint-Petersburg, 22-26 May 2018). London: Taylor and Francis Group. 2018. Vol. 1. P. 3-16.
18. Petroleum Related Rock Mechanics. Vol. 53 / Fjar Erling, R.M.Holt, A.M.Raaen, R.Risnes, P.Horsrud. 2nd Edition. Elsevier Science. 2008. 514 p.
19. Sheng-Qi Yang. Strength and deformation behavior of red sandstone under multi-stage triaxial compression // Canadian Geotechnical Journal. 2012. Vol. 49. № 6. P. 694-709. DOI: 10.1139/t2012-035
20. Silberschmidt V.G. Analysis of Cracking in Rock Salt / V.G.Silberschmidt, V.V.Silberschmidt // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2000. Vol. 33. № 1. P. 53-70. DOI: 10.1007/s006030050004
21. Strength and deformation characteristics of cement-mixed gravelly soil in multiple-step triaxial compression / A.Taheri, Y.Sasaki, F.Tatsuoka, K.Watanabe // Soils and Foundations. 2012. Vol. 52. № 1. P. 126-145. DOI: 10.1016/j.sandf.2012.01.015

22. *Taheri A.* Use of down-hole triaxial apparatus to estimate the mechanical properties of heterogeneous mudstone / A.Taheri, K.Tani // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2008. Vol. 45. № 8. P. 1390-1402. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2008.01.017
23. *Vergara M.R.* Large Scale Tests on Jointed and Bedded Rocks Under Multi-Stage Triaxial Compression and Direct Shear / M.R.Vergara, P.Kudella, T.Triantafyllidis // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2015. Vol. 48. № 1. P. 75-92. DOI: 10.1007/s00603-013-0541-1
24. *Villamor Lora R.* Geomechanical Characterization of Marcellus Shale / R.Villamor Lora, E.Ghazanfari, E.Asanza Izquierdo // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2016. Vol. 49. № 9. P. 3403-3424. DOI: 10.1007/s00603-016-0955-7
25. *Youn Heejung.* Multi-stage triaxial test on brittle rock / Heejung Youn, Fulvio Tonon // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2010. Vol. 47. № 4. P. 678-684. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2009.12.017

Авторы: **И.Л.Паньков**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ivran@mi-perm.ru (Горный институт Уральского отделения РАН, Пермь, Россия), **И.А.Морозов**, ассистент, imorozov.work@yandex.ru (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия).

Статья поступила в редакцию 31.01.2019.

Статья принята к публикации 27.02.2019.