

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СОЛЯНЫХ ПОРОД ПРИ СЖАТИИ ОБРАЗЦОВ РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТЫ

И.Л. Паньков, И.А. Морозов

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

Цель работы – изучение влияния коэффициента трения на механические показатели каменной соли при сжатии образцов различной высоты.

В ходе экспериментальных исследований было испытано 49 образцов тонкосреднеслоистой каменной соли Усть-Яйвинского участка Верхнекамского калийного месторождения. При этом по результатам испытания 12 образцов на универсальном испытательном комплексе MTS 816 получены значения коэффициентов трения покоя и скольжения для трех типов исследуемых контактов: соль – абразивный материал, соль – металл, соль – фторопласт. Проведено сжатие 37 образцов на испытательной установке ToniNorm 204 при определенных ранее контактных условиях, обеспечение которых осуществлялось с помощью специально изготовленных фторопластовых, металлических, абразивных прокладок, с последующим определением комплекса механических показателей.

По результатам экспериментов на трение определены коэффициенты трения контактов: соль – абразивный материал, соль – металл, соль – фторопласт. По экспериментам на сжатие для каждого из 37 образцов построена полная диаграмма деформирования и определены значения показателей механических свойств каменной соли в зависимости от высоты испытываемого образца и коэффициента трения покоя между торцами образца и плитами пресса. Определен характер влияния торцевых условий и высоты образца на предел прочности, разрушающую деформацию, удельную энергоемкость деформирования, модуль спада. Была проведена статистическая обработка экспериментальных данных.

Полученные результаты предназначены для совершенствования методики испытаний горных пород на сжатие.

Ключевые слова: горные породы, каменная соль, механические свойства, торцевые условия, контактные условия, коэффициент трения покоя, коэффициент трения скольжения, предел прочности, разрушающая деформация, удельная энергоемкость деформирования, модуль спада, одноосное сжатие, диаграмма деформирования, разрушение, конусы уплотнения.

STUDY OF THE FRICTION COEFFICIENT INFLUENCE ON SALT ROCKS MECHANICAL INDICATORS IN SAMPLE COMPRESSION OF VARYING HEIGHTS

I.L. Pan'kov, I.A. Morozov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

The aim of this work is to study the influence of the friction coefficient on the mechanical properties of salt rock in compression samples of varying heights.

In experimental studies 49 samples of fine-medium layered salt rock of Ust-Yaivinsk area Verkhnekamskoe potash deposit were tested. In this case on the results of testing 12 samples on a universal testing complex MTS 816, the values of the static friction and sliding coefficients for three types of contacts investigated: salt – abrasive, salt – metal, salt – fluoroplastic. Compression of 37 samples was conducted in the test machine ToniNorm 204 under certain contact conditions as before, which were carried out using a specially made fluoroplastic, metal, abrasive pads, followed by determination of the mechanical properties of the complex.

According to the results of experiments on friction coefficients of friction are determined of contacts: salt – abrasive material, salt – metal, salt – fluoroplastic. By experiments on compression for each of 37 samples to construct a complete stress-strain diagram and the values of mechanical properties of rock salt depending on the height of the test sample and the coefficient of static friction between the ends of the sample and press plates. The character of the influence of the end conditions and the height of the sample on the tensile strength, breaking strain, strain energy density, module recession was determined. Statistical analysis of the experimental data was carried out.

The obtained results are intended to improve the testing methods of rocks in compression.

Keywords: rock, rock salt, mechanical properties, end conditions, contact conditions friction force, coefficient of static friction, coefficient of sliding friction, tensile strength, breaking strain, strain energy density, module recession, uniaxial compressive, stress-strain diagram, destruction, cones seal.

Введение

Геомеханическое обеспечение безопасных условий ведения горных работ на всех стадиях горного производства предполагает наличие объективной информации о свойствах пород при различных условиях и режимах нагружения, базирующихся на современных экспериментальных и теоретических методах их определения [1, 2, 3]. Данные требования особенно актуальны для месторождений калийно-магниевого солей, особенность разработки которых связана с необходимостью сохранения сплошности водозащитной толщи, нарушение которой может привести к затоплению калийного рудника. Мировая практика разработки соляных месторождений насчитывает около 80 затопленных и не подлежащих восстановлению калийных и соляных рудников по большей части на территории Германии [4]. Из российских затопленных рудников стоит отметить рудник № 1 Илецкого месторождения каменной соли, а также два рудника Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей: БКПРУ-1 и БКПРУ-3. За время эксплуатации рудника № 1 Илецкого месторождения отмечались многократные прорывы вод и рассолов в подземные горные выработки по карстовым трещинам и пустотам. 17 февраля 1979 г. рудник № 1 был затоплен по причине прорыва надсолевых вод в горные выработки вследствие недостаточной мощности водозащитной потолочины при принятых параметрах системы разработки [5]. Затопление БКПРУ-3 произошло в июле 1986 г. В процессе выщелачивания солей над блоком № 8 обрушилась дневная поверхность с образованием провала длиной 60–80 м и шириной 40–50 м [6]. В октябре 2006 г. произошел прорыв рассола в горные выработки БКПРУ-1, что привело к его затоплению. В 2007 г. на территории промышленной площадки образовался провал, позже достигший размеров 200×200 м [6, 7]. Несмотря на то, что существовали прогнозы деформа-

ций земной поверхности под влиянием затопленного рудника [8], в ноябре 2010 г. вблизи провала в момент движения грузового железнодорожного состава под землю провалился вагон. В настоящее время на данном месте образовался новый провал. Стоит также отметить, что даже небольшое рассолопроявление в выработках калийного месторождения может сильно повлиять на физико-механические показатели свойств соли, которые существенным образом зависят от влажности [9]. Обобщая вышеизложенное, можно утверждать, что необходимым условием безопасности ведения горных работ является соответствие параметров системы разработки горно-геологическим условиям конкретных обрабатываемых участков.

При расчете параметров системы разработки одним из основных показателей устойчивости горных выработок является предел прочности на одноосное сжатие [10]. Но, несмотря на то, что ГОСТ 21153.2–84¹ оговаривает условия лабораторных испытаний для его определения, при массовых испытаниях соляных пород не всегда имеется возможность провести эксперимент в соответствии с установленными требованиями.

Согласно исследованиям М. Кулбауф [11], характер деформации и значение прочности при сжатии существенно изменяются при снижении сцепления на контактах образца с плитами пресса, в частности при использовании прокладок, смазанных графитом. При этом для кубических образцов каменной соли с длиной грани 5,08 см значение предела прочности снижается ровно в 2 раза. При испытании кубических образцов каменной соли с размером грани 10 см Ф.В. Уленбекером [11] было установлено возрастание прочности при сжатии до 40,3 МПа против 31 МПа для образцов

¹ ГОСТ 21153.2–84. Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии. М.: Изд-во стандартов, 1985. 10 с.

без прокладок. В работе [11] также упоминается об исследованиях Р. Квапил, в которых устанавливается, что смазка на плоскостях давления снижает значения предела прочности на 30–50 %. В работе [11] отмечается, что применение различных видов смазки на контактах образца с плитами пресса при испытаниях на сжатие приводит к значительному снижению предела прочности, причем интенсивность уменьшения последнего зависит от соотношения вертикального и поперечного размеров образцов [12]. Для высоких образцов при отношении высоты к длине стороны или диаметру образца ≥ 3 контактные условия практически не оказывают влияния на значение прочности [11]. В работе [13] для оценки влияния контактных условий на прочностные и деформационные свойства образцов соляных пород проведены испытания образцов пестрого силвинита в режиме «сухого трения» и при использовании в качестве прокладок тонких листов фторопласта толщиной 0,1 мм, которые устанавливались между торцами образца и плитами пресса. Применение фторопластовых прокладок способствовало уменьшению предела прочности, разрушающей деформации, модуля деформации, модуля спада. В работах [13–15] отмечается, что интенсивность влияния прокладок зависит от отношения высоты образца к его диаметру. По данным источника [11] М.Ф. Кунтыш отмечает закономерное снижение прочности при шлифовке и полировке поверхностей образцов. В работе [16] указывается, что при полном сцеплении на контактах образца с плитами испытательной машины разрушение в приторцевых областях происходит по поверхностям конусов, оси которых обычно совпадают с осью образца, а при отсутствии сцепления на контактах разрушение происходит по поверхностям, параллельным направлению внешней сжимающей нагрузки, – столбчатое разрушение или раскалывание. И.В. Баклашов [16] указывает, что

отсутствие сцепления на торцах уменьшает прочность на одноосное сжатие на 30–50 %. Изучая напряженное состояние в упругом цилиндре, нагруженном плитами пресса, Пенг [17] указывает на высокую концентрацию напряжений по краям торцевой поверхности образца, способствующих разрушению образца в виде конусов или клиньев.

Обобщая результаты предыдущих исследований [11–17], а также [18, 19], можно сказать, что значение предела прочности, получаемое при сжатии, в значительной степени зависит от величин сил трения между торцами образца и плитами пресса. Так, с возрастанием силы трения фиксируется увеличение значения предела прочности, при этом интенсивность ее влияния на получаемое значение предела прочности с увеличением высоты образца снижается. Рост трения между образцом и нажимными плитами пресса вызывает формирование неоднородного напряженного состояния его приконтактных зон, что выражается в образовании «конусов уплотнения». Напротив, снижение трения ведет к столбчатому разрушению образца за счет прорастания субвертикальных трещин.

Несмотря на существенное влияние трения на характер деформирования и разрушения соляных пород, ни в одной из указанных работ определение коэффициента трения не проводилось, а также, несмотря на большое количество опытных данных по запредельным характеристикам соляных пород [11, 20, 21, 25, 26 и др.], основная часть исследователей оперируют исключительно значениями предела прочности и разрушающей деформации.

Существует ряд способов снижения влияния эффекта трения на значения получаемых показателей механических свойств горных пород, а именно: увеличение отношения высоты к диаметру образца, использование образцов специальной формы, смазка контактирующих поверхностей, применение нагруженных

плит того же диаметра, что и испытуемый образец и др. Каждый из этих способов обладает своими недостатками. Увеличение отношения высоты к диаметру образца может привести к снижению его устойчивости, искажению результатов эксперимента. Применение для экспериментов на сжатие образцов специальной формы затруднено из-за сложности их изготовления. Применение смазки искажает экспериментальные данные из-за ее внедрения в породу. Использование нагрузочных плит того же диаметра, что и образец, также не нашло широкого применения из-за трудоемкости эксперимента. В связи с вышеизложенным при расчете предела прочности образца при одноосном сжатии используют эмпирические коэффициенты формы, которые позволяют учесть неоднородность напряженного состояния в образце (аналогичные коэффициенты используются и для других механических показателей). Поскольку трение влияет не только на значения показателей, получаемых при одноосном сжатии, но и на характеристики, получаемые при реологических [22, 23] и стабилметрических [24] испытаниях, предлагается ввести в коэффициент формы коэффициент трения в явном виде, что позволит конкретизировать условия испытания. В связи с этим в рамках совершенствования методики испытания горных пород актуальными являются исследования, направленные на изучение влияния коэффициента трения на механические показатели соляных пород при сжатии.

Экспериментальные исследования

В ходе экспериментальных исследований было испытано 49 образцов тонко-среднеслойной каменной соли Усть-Яйвинского участка Верхнекамского калийного месторождения.

Для определения торцевых условий одноосного сжатия были проведены экспериментальные исследования на универсальном испытательном комплексе

MTS 816 (рис. 1) на 12 образцах высотой 30 мм и диаметром 100 мм по определению коэффициента трения на трех типах контактов: соль – фторопласт, соль – металл, соль – абразивный материал. В этом комплексе тип привода сервогидравлический; жесткость рамы $1,1 \times 10^9$ Н/м; максимальное усилие на сжатие 496 кН; максимальное усилие на растяжение 291 кН; максимальное усилие сдвигового поршня 261 кН; ход поршней 100 мм; размеры образцов $150 \times 150 \times 300$ мм; внутренний дифференциальный трансформатор для измерения линейных перемещений (LVDT) сжатия (растяжения) точностью 0,001 мм; четыре вертикальных датчика LVDT для измерения нормальных деформаций и наклона образца во время испытания с ходом ± 25 мм и точностью 0,001 мм; два горизонтальных датчика LVDT для измерения сдвиговых деформаций образца с ходом ± 25 мм и точностью 0,001 мм. В качестве абразивного материала использовалась шкурка марки 12-Н СФЖ У1С. При испытаниях на контакте соль – фторопласт применялись фторопластовые листы толщиной 0,1 мм.



Рис. 1. Универсальный испытательный комплекс MTS 816

Для проведения экспериментов на трение образец, помещенный в специальную форму, по контуру заливается

гипсом и для обеспечения достаточной жесткости фиксации оставлялся на сутки. Через сутки форма помещалась в нижнюю матрицу испытательной установки, а к верхней матрице крепилась металлическая пластина, на которой фиксировались испытываемые материалы: абразивный материал, лист фторопласта. Трение по контакту соль – металл определялось по специально изготовленной нижней металлической пластине.

Каждый образец последовательно проходил серию испытаний при различных значениях вертикальной нагрузки (от 2,4 до 55,2 МПа с шагом 4,8 МПа), в каждом из которых на образец подавалась вертикальная нагрузка со скоростью 60 кН/мин. Спустя 10 с после достижения вертикальной нагрузкой заранее заданного значения происходило горизонтальное перемещение нижней матрицы установки вместе с помещенной в нее формой с жестко зафиксированным в ней образцом со скоростью 2 мм/мин. При этом на нижнюю матрицу действовало сдвиговое усилие, которое по абсолютной величине равно силе трения, возникающей на исследуемом контакте. После того как образец перемещался заданное время, происходило сбрасывание сдвигового усилия, а затем и вертикального.

По результатам испытаний на трение для каждого образца строилась зависимость силы трения $F_{тр}$ от перемещения h (рис. 2). Определение коэффициентов трения осуществлялось согласно закону Амонта [25, 26]:

$$\mu = \frac{F_{тр}}{N},$$

где N – вертикальная сила, действующая на образец.

В ходе экспериментальных исследований было отмечено, что при вертикальной нагрузке свыше 31,2 МПа происходит существенное уменьшение диаметра испытываемого образца вследствие интенсивного разрушения его приконтурной части и резкое снижение ко-

эффициента трения на всех типах контактов.

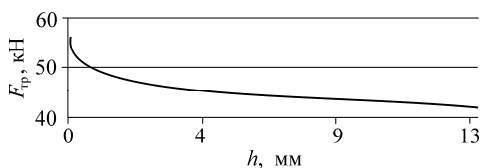


Рис. 2. Зависимость силы трения $F_{тр}$ от перемещения h одного из образцов относительно верхней матрицы испытательной установки

Коэффициенты трения покоя и скольжения (таблица) определялись как средние значения по трем образцам для каждого типа контакта для вертикальных нагрузок, не превышающих 31,2 МПа.

Коэффициенты трения для трех типов контактов

Тип контакта	Коэффициент трения покоя	Коэффициент трения скольжения
Соль – абразивный материал	0,53±0,1	0,33±0,09
Соль – металл	0,30±0,03	0,23±0,03
Соль – фторопласт	0,05±0,01	0,01±0,004

Испытания на сжатие проводились на 37 образцах диаметром 100 мм с отношением высоты к диаметру 0,75; 1,00; 1,25; 1,50 на испытательной установке ToniNorm 2041 (рис. 3) в режиме заданной деформации (1 мм/мин) при определенных ранее контактных условиях. Установка предназначена для определения прочности на сжатие образцов различных геоматериалов. Тип привода гидравлический (регулирование скорости нагружения посредством сервоклапана в замкнутом контуре (closed loop)); максимальное усилие испытания 5000 кН; ход поршня 100 мм; высокая продольная и поперечная жесткость за счет четырехстоечной конструкции и соединения стоек верхней траверсой с предварительным напряжением; просторная рабочая зона; рабочая высота 1050 мм; полная устано-

вочная площадь (ширина×глубина) – 400×700 мм; измерение усилия с помощью прецизионного датчика давления масла в поршне; потенциометрическая система измерения хода поршня; программированное проведение испытаний с помощью регулировочной системы TONITROL. Контакт соль – фторопласт обеспечивался фторопластовыми прокладками толщиной 0,1 мм, размещаемыми между торцами образца и плитами пресса. Контакт соль – металл обеспечивался за счет специально изготовленных металлических прокладок, которые помещались между торцами образца и плитами пресса. Контакт соль – абразивный материал обеспечивался за счет прокладок, изготовленных из шкурки марки 12-Н СФЖ У1С, размещаемых между торцами образца и плитами пресса, прилегающих шероховатой стороной к торцам образца.



Рис. 3. Испытательная установка ToniNorm 2041

На рис. 4–6 представлены фотографии образцов, испытанных на сжатие, с отношением высоты к диаметру 1,00. При испытании образца, контактирующего с абразивным материалом, наблюдалось образование на торцах ярко выраженных конусов уплотнения (см. рис. 4). На рис. 5 представлен образец, испытанный при контакте соль – металл. В данном случае также наблюдалось образование конусов уплотнения, но с менее четкой границей. На рис. 6 представлен образец, испытанный при контакте соль – фторопласт. По данному снимку

видно, как образец разрушился за счет прорастания субвертикальных трещин без образования конусов уплотнения. Полученные виды разрушения соответствуют данным работ [11, 16–18].



Рис. 4. Сжатие при контакте соль – абразивный материал



Рис. 5. Сжатие при контакте соль – металл



Рис. 6. Сжатие при контакте соль – фторопласт

По результатам экспериментов на сжатие каждого образца проводилось построение полной диаграммы деформирования (рис. 7), и по методике, описанной в работе [13], определялся следующий

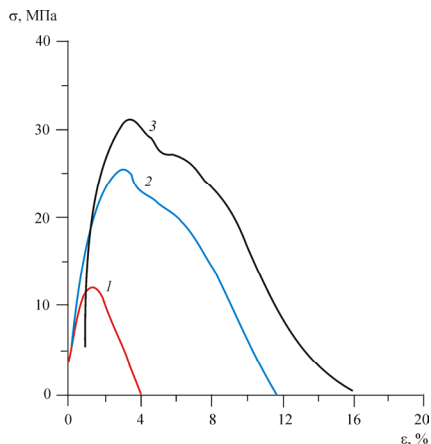


Рис. 7. Характеристика диаграмм деформирования, полученных при сжатии образцов каменной соли с отношением высоты к диаметру 1,00: 1 – при контакте соль – фторопласт; 2 – при контакте соль – металл; 3 – при контакте соль – абразивный материал

комплекс механических показателей: предел прочности, разрушающая деформация, предел упругости, упругая деформация, секущий модуль деформации, касательный модуль деформации, модуль упругости, модуль спада, удельная энергоёмкость деформирования. Рис. 7 наглядно демонстрирует, насколько сильно характер разрушения и вид получаемых диаграмм деформирования, а следовательно, и значения получаемых показателей зависят от контактных условий.

Для анализа полученных данных экспериментальных исследований построены качественные зависимости влияния коэффициента трения покоя между торцами образца и плитами прессы при сжатии образцов каменной соли различной высоты на предел прочности (рис. 8, а),

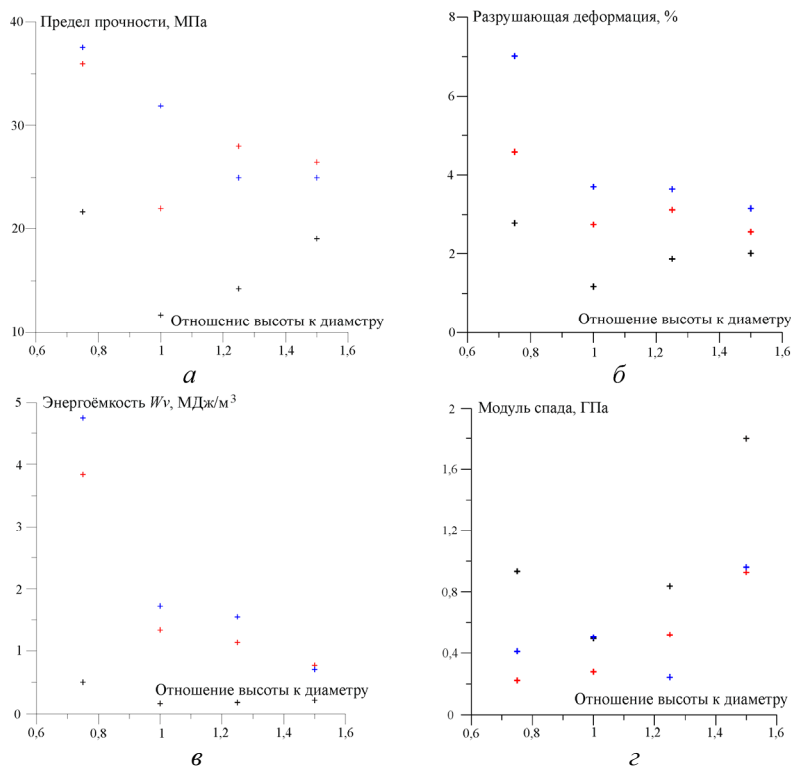


Рис. 8. Характер изменения: а – предела прочности; б – разрушающей деформации; в – удельной энергоёмкости деформирования; г – модуля спада при сжатии каменной соли в зависимости от коэффициента трения покоя и высоты образца. Черным показаны значения показателей, полученные в испытаниях при контакте соль – фторопласт (коэффициент трения покоя равен 0,05); красным – в испытаниях при контакте соль – металл (коэффициент трения покоя равен 0,30); синим – в испытаниях при контакте соль – абразивный материал (коэффициент трения покоя равен 0,53)

разрушающую деформацию (рис. 8, б), удельную энергоёмкость деформирования (рис. 8, в), модуль спада (рис. 8, г).

На рис. 8, а видно, что при отношении высоты к диаметру образца 0,75 и увеличении коэффициента трения покоя с 0,05 до 0,53 происходит рост значения предела прочности с 22 до 37 МПа. При этом разрушающая деформация возрастает с 2,8 до 7 % (см. рис. 8, б), удельная энергоёмкость деформирования – с 0,5 до 4,7 МДж/м³ (см. рис. 8, в). Увеличение отношения высоты к диаметру с 0,75 до 1,50 ведет к снижению влияния коэффициента трения на значения предела прочности, разрушающей деформации и удельной энергоёмкости деформирования. Так, для образцов с отношением высоты к диаметру 1,50 изменение коэффициента трения от 0,05 до 0,53 влечет за собой изменение значения предела прочности от 19 до 27 МПа (см. рис. 8, а), разрушающей деформации – от 2,0 до 3,2 % (см. рис. 8, б), удельной энергоёмкости деформирования – от 0,2 до 0,8 МДж/м³ (см. рис. 8, в). При увеличении отношения высоты к диаметру образца с 0,75 до 1,50 наблюдается рост модуля спада: при отношении высоты к диаметру 0,75 модуль спада с увеличением коэффициента трения с 0,05 до 0,53 изменяется от 0,9 до 0,2 ГПа, а при отношении высоты к диаметру 1,50 – от 1,8 до 0,9 ГПа (см. рис. 8, г).

В ходе исследования была проведена статистическая обработка экспериментальных данных. В среднем ошибка при определении предела прочности составляет 9,6 %, разрушающей деформации – 8,7 %, удельной энергоёмкости деформирования – 14,3 %, модуля спада – 25,3 %.

Заключение

При анализе трудов исследователей было выявлено, что ни одна из рассмотренных работ не содержит конкретных значений коэффициентов трения, но при этом подчеркивается особая важность

контактных условий (сил трения) при сжатии образцов горных пород. Также многие из рассмотренных работ представляют качественные оценки только лишь для предела прочности и разрушающей деформации, а остальные показатели механических свойств, получаемые при сжатии, в том числе на запредельной стадии диаграммы деформирования, не рассматриваются.

В ходе экспериментальных исследований по изучению влияния торцевых условий и высоты образца на механические показатели соляных пород при сжатии было испытано 49 образцов тонкосреднеслоистой каменной соли Усть-Яйвинского участка Верхнекамского калийного месторождения, 12 из которых были испытаны на универсальном испытательном комплексе MTS 816 для определения контактных условий в виде коэффициентов трения контактов: соль – фторопласт, соль – металл, соль – абразивный материал. 37 образцов были испытаны на сжатие на испытательной установке ToniNorm 2041 в режиме заданной деформации (1 мм/мин) при определенных ранее контактных условиях. Обеспечение определенных контактных условий осуществлялось с помощью специально изготовленных фторопластовых, металлических, абразивных прокладок, размещаемых между торцами испытываемого образца и плитами пресса.

В рамках дальнейших исследований планируется провести серию дополнительных испытаний с целью повышения статистической значимости экспериментальных данных и определения функциональных зависимостей влияния коэффициента трения и высоты образца на механические показатели соляных пород при сжатии.

Список литературы

1. Барях А.А. Фундаментальные основы мониторинга безопасности освоения георесурсов в сложных горно-геологических условиях // Дни наук о Земле на Урале. Круглый стол «Горно-металлургический комплекс Урала – современные проблемы и пути их решения»: материалы всерос. науч. конф. с междунар. участием / Ин-т геол. и геохим. Урал. отд-ния Рос. акад. наук. – Екатеринбург, 2012. – 160 с.
2. Адушкин В.В., Опарин В.Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – Ч. I, № 2.
3. Адушкин В.В., Опарин В.Н. От явления знакопеременной реакции горных пород на динамические воздействия – к волнам маятникового типа в напряженных геосредах // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2013. – Ч. II, № 2. – С. 3–46.
4. Лаптев Б.В. Историография аварий при разработке соляных месторождений // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 12. – С. 63–67.
5. Лаптев Б.В., Казаченко М.Г. О проблемах разработки Илецкого месторождения каменной соли // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 6. – С. 53–54.
6. Лаптев Б.В. Аварийные ситуации на Верхнекамском месторождении калийно-магниевых солей // Безопасность труда в промышленности. – 2009. – № 8. – С. 28–31.
7. Санфиоров И.А. Сейсмо-хронология, БКПРУ-1, 2006 год // Горное эхо. – 2007. – № 3.
8. Маравок В.Е., Тенисон Л.О. Прогноз ожидаемых деформаций земной поверхности, зданий и сооружений, расположенных на промплощадке БКПРУ-1, железно-дорожной станции Березники, промплощадке БШСУ с учетом всей горнотехнической ситуации // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – № 1.
9. Константинова С.А., Габдрахимов И.Х. Расчет напряженно-деформированного состояния соляного массива в окрестности околоствольных выработок с учетом увлажнения приконтурных пород // Горный журнал. – 1980. – № 5.
10. Coates D.F. Classification of rocks for rock mechanics // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1964. – № 1.
11. Прокураев Н.М., Пермяков Р.С., Черников А.К. Физико-механические свойства соляных пород. – Л.: Недра, 1973. – 271 с.
12. Dreyer W. Die Bedeutung von Modellversuchen an Salzgesteinen für die Beurteilung geburgsmechanischer Probleme im Kalibergbau // Bergakademia. – 1964. – № 16.
13. Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 199 с.
14. Mogi K. Some precise measurements of fracture strength of rocks under uniform compressive strength // Rock Mechanics Engineering Geology. – 1966. – № 4.
15. Hudson J.A., Brown E.T., Rummel F. The controlled failure of rock discs and rings loaded in diametral compression // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1972. – № 9.
16. Баклашов И.В. Геомеханика: учеб. для вузов: в 2 т. Т. 1. Основы геомеханики. – М.: Изд-во Моск. гос. горн. ун-та, 2004. – 208 с.
17. Peng S.D. Stresses within elastic circular culinders loaded uniaxially und triaxially // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1971. – № 4.
18. Прочность и деформируемость горных пород / Ю.М. Карташов, Б.В. Матвеев, Г.В. Михеев, А.Б. Фадеев. – М.: Недра, 1979. – 269 с.
19. Barton N.R. A model study of rock-joint deformation // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 1972. – № 9.
20. Лаптев Б.В. Об удароопасности соляных пород Верхнекамского месторождения // Безопасность труда в промышленности. – 2001. – № 4.
21. Лисицын А.И. Прочностные характеристики соляных пород Старобинского месторождения // Калийная промышленность. – 1980. – № 5.
22. Асанов В.А., Паньков И.Л., Аникин В.В. Деформирование соляных пород при длительном нагружении // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 4.
23. Пушкарев В.И., Афанасьев Б.Г. Ускоренный метод определения предела длительной прочности слабых горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1973. – № 5.

24. Федорова Е.А. Механический стабилметр // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2008. – № 4.
25. Пенкин Н.С., Пенкин А.Н., Сербин В.М. Основы трибологии и триботехники: учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2008. – 206 с.
26. Тагильцев С.Н. Базовые понятия геомеханики – трение и деформация // Геомеханика в горном деле: докл. науч.-техн. конф., 12–14 октября 2011 г. / Ин-т горн. дела Урал. отд-ния Рос. акад. наук. – Екатеринбург, 2012. – 261 с.

References

1. Bariakh A.A. Fundamental'nye osnovy monitoringa bezopasnosti osvoeniia georesursov v slozhnykh gorno-geologicheskikh usloviakh [Fundamentals of for monitoring the safety georesources development in challenging mining and geological conditions]. *Materialy vsrossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Dni nauk o Zemle na Urale"*. Ekaterinburg: Institut geologii i geokhimii Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 2012. 160 p.
2. Adushkin V.V., Oparin V.N. Ot iavleniia znakoperemnoi reaktsii gornykh porod na dinamicheskie vozdествiia – k volnam maiatnikovogo tipa v napriazhennykh geosredakh [From the phenomenon of variable sign reactions of rocks on the dynamic effects – to the waves in strained pendular geomedium]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2012. vol. 1, no. 2.
3. Adushkin V.V., Oparin V.N. Ot iavleniia znakoperemnoi reaktsii gornykh porod na dinamicheskie vozdествiia – k volnam maiatnikovogo tipa v napriazhennykh geosredakh [From the phenomenon of variable sign reactions of rocks on the dynamic effects – to the waves in strained pendular geomedium]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2013, vol. 2, no. 2.
4. Laptev B.V. Istoriografiia avarii pri razrabotke solianyykh mestorozhdenii [Historiography of accidents in the development of salt deposits]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2011, no. 12.
5. Laptev B.V., Kazachenko M.G. O problemakh razrabotki lletskego mestorozhdeniia kamennoi soli [On the problems of development lletskego rock salt deposits]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2004, no. 6.
6. Laptev B.V. Avariinye situatsii na Verkhenskomsom mestorozhdenii kaliino-magnievyykh soli [Emergency situations on Verhekamskom deposit of potassium and magnesium salts]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2009, no. 8.
7. Sanfirov I.A. Seismo-khronologiya, BKPRU-1, 2006 god [Seismic chronology, BKPRU-1, 2006]. *Gornoe echo*, 2007, no. 3.
8. Marakov V.E., Tenison L.O. Prognoz ozhidaemykh deformatsii zemnoi poverkhnosti, zdaniy i sooruzhenii, raspolozhennykh na promplohchadke, zhelezno-dorozhnoi stantsii Berezniki, promplohchadke BShSU s uchetom vsei gornotekhnicheskoi situatsii [Forecast of expected ground deformation, buildings and structures located on the industrial site BKPRU-1, railway station of Berezniki industrial site BShSU considering all mine technical situation]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten'*, 2009, no. 1.
9. Konstantinova S.A., Gabdrakhimov I.Kh. Raschet napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia solianogo massiva v okrestnosti okolostvol'nykh vyrabotok s uchetom uvlazhneniia prikonturnyykh porod [Calculation of the stress-strain state in a neighborhood salt massif near barrel the workings considering moistening the marginal rocks]. *Gornyi zhurnal*, 1980, no. 5.
10. Coates D.F. Classification of rocks for rock mechanics. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1964, no. 1.
11. Proskuriakov N.M., Permiakov R.S., Chernikov A.K. Fiziko-mekhanicheskie svoystva solianyykh porod [Physical and mechanical properties of salt rocks]. Leningrad: Nedra, 1973. 271 p.
12. Dreyer W. Die Bedeutung von Modellversuchen an Salzgesteinen für die Beurteilung geburgeshanischer Probleme im Kalibergbau. *Bergakademia*, 1964, no. 16.
13. Bariakh A.A., Asanov V.A., Pan'kov I.L. Fiziko-mekhanicheskie svoystva solianyykh porod Verkhnekamskogo kaliinogo mestorozhdeniia: uchebnoe posobie [Physical and mechanical properties of salt rocks Verkhnekamskoe potash deposit: Tutorial]. Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2008. 199 p.
14. Mogi K. Some precise measurements of fracture strength of rocks under uniform compressive strength. *Rock Mechanics Engineering Geology*, 1966, no. 4.
15. Hudson J.A., Brown E.T., Rummel F. The controlled failure of rock discs and rings loaded in diametral compression. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1972, no. 9.

16. Baklashov I.V. Geomekhanika. Tom 1. Osnovy geomekhaniki [Geomechanics. Vol. 1. Fundamentals of Geomechanics]. Moskovskii gosudarstvennyi gornyi universitet, 2004. 208 p.
17. Peng S.D. Stresses within elastic circular culinders loaded uniaxially und triaxially. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1971, no. 4.
18. Kartashov Iu.M., Matveev B.V., Mixeev G.V., Fadeev A.B. Prochnost' i deformiruemost' gornykh porod [Strength and deformability of rock]. Moscow: Nedra, 1979. 269 p.
19. Barton N.R. A model study of rock-joint deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1972, no. 9.
20. Laptev B.V. Ob udaroopasnosti solianykh porod Verkhnekamskogo mestorozhdeniia [Bump hazard of salt rocks Verkhnekamskoye deposit]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*, 2001, no. 4.
21. Lisitsyn A.I. Prochnostnye kharakteristiki solianykh porod Starobinskogo mestorozhdeniia [Strength characteristics of salt Starobin deposit]. *Kaliinaia promyshlennost'*, 1980, no. 5.
22. Asanov V.A., Pan'kov I.L., Anikin V.V. Deformirovanie solianykh porod pri dlitel'nom nagruzhenii [Deformation of salt rocks in long-term loading]. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2011, no. 4.
23. Pushkarev V.I., Afanas'ev B.G. Uskorenniy metod opredeleniia predela dlitel'noi prochnosti slabykh gornykh porod [Accelerated method for determining the limit of long-term strength of weak rocks]. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 1973, no. 5.
24. Fedorova E.A. Mekhanicheskii stabilometr [Mechanical stabilometry]. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*, 2008, no. 4.
25. Penkin N.S., Penkin A.N., Serbin V.M. Osnovy tribologii i tribotekhniki: uchebnoe posobie [Fundamentals of tribology and Tribotechnics: Tutorial]. Moscow: Mashinostroenie, 2008. 206 p.
26. Tagil'tsev S.N. Bazovye poniatia geomekhaniki – trenie i deformatsiia [Basic concepts of geomechanics – friction and deformation]. *Geomekhanika v gornom dele*. Ekaterinburg: Institut gornogo dela Ural'skogo otdeleniia Rossiiskoi akademii nauk, 2012. 261 p.

Об авторах

Паньков Иван Леонидович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры разработки месторождений полезных ископаемых Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: ivpan@mi-perm.ru).

Морозов Иван Александрович (Пермь, Россия) – Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: ivan.morozov.perm@yandex.ru).

About authors

Pan'kov Ivan Leonidovich (Perm, Russia) – Ph.D. in technical sciences, associate professor of exploitation of mineral deposits department of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolskiy ave., 29; e-mail: ivpan@mi-perm.ru).

Morozov Ivan Aleksandrovich (Perm, Russia) – Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolskiy ave., 29; e-mail: ivan.morozov.perm@yandex.ru).

Получено 15.06.2013