



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 4, 2018

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2018.4.05

УДК 539.4

## МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ, ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛЯНЫХ ПОРОД ПРИ ПРЯМОМ РАСТЯЖЕНИИ ПОРОДНЫХ ОБРАЗЦОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

**В.А. Асанов<sup>1</sup>, И.Л. Паньков<sup>1</sup>, В.С. Кузьминых<sup>2</sup>, И.А. Морозов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

<sup>2</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 17 июля 2018 г.  
Принята: 6 декабря 2018 г.  
Опубликована: 28 декабря 2018 г.

#### Ключевые слова:

прочность при растяжении, разрушающая деформация, модуль деформации, энергоемкость деформирования, соляные породы, горные породы, прямое растяжение, одноосное сжатие, численное моделирование, Бразильский метод.

### АННОТАЦИЯ

Разработка месторождений полезных ископаемых невозможна без адекватного представления о свойствах как полезного ископаемого, так и вмещающих пород. Устойчивость подземных объектов и сооружений определяется способностью пород сопротивляться повышенным нагрузкам, возникающим вследствие перераспределения горного давления в процессе добычи полезного ископаемого. Зачастую именно растягивающие напряжения являются причиной обрушения кровли горных выработок. Одним из основных источников информации для проектирования горнодобывающих предприятий являются лабораторные исследования поведения породных образцов в различных режимах нагружения. Целью данной работы является формирование ключевых методических подходов к определению прочностных, деформационных и энергетических характеристик соляных пород при прямом растяжении в лабораторных условиях. Объектом исследования являются соляные породы Верхнекамского калийно-магниевого месторождения.

Рассмотрены основные проблемы прямого растяжения породных образцов в лабораторных условиях. Выполнен сравнительный анализ результатов прямого растяжения соляных образцов различной геометрии. На основании лабораторных и численных экспериментов предложена геометрия образца, учитывающая характер возникающего в процессе нагружения напряженного состояния, размер зерен, влияние заделки. Предложен материал для надежной фиксации образца в обоймах, обладающий хорошей адгезией как с соляным образцом, так и со стальной поверхностью обойм. Разработано центрирующее приспособление, обеспечивающее надежную соосную фиксацию образца в обоймах. Разработано устройство, позволяющее фиксировать продольную деформацию образца непосредственно в рабочей части тремя датчиками консольного типа, устанавливаемыми по схеме равностороннего треугольника, что существенно повышает надежность экспериментальных данных.

Полученные результаты предназначены для определения механических характеристик соляных пород Верхнекамского калийно-магниевого месторождения при прямом растяжении.

© ПНИПУ

© Асанов Владимир Андреевич – д.т.н., проф., зав. лаб., e-mail: [ava@mi-perm.ru](mailto:ava@mi-perm.ru)  
Паньков Иван Леонидович – к.т.н., доц., н.с., e-mail: [ivpan@mi-perm.ru](mailto:ivpan@mi-perm.ru), [ID 0000-0001-8157-8426](https://orcid.org/0000-0001-8157-8426)  
Кузьминых Виталий Сергеевич – инж., e-mail: [vskuzminykh@mail.ru](mailto:vskuzminykh@mail.ru), [ID 0000-0002-8053-0786](https://orcid.org/0000-0002-8053-0786)  
Морозов Иван Александрович – асп., e-mail: [imorozov.work@yandex.ru](mailto:imorozov.work@yandex.ru), [ID 0000-0002-6513-1293](https://orcid.org/0000-0002-6513-1293)

Vladimir A. Asanov – Doctor of Technology, Professor, Head Laboratory, e-mail: [ava@mi-perm.ru](mailto:ava@mi-perm.ru)  
Ivan L. Pankov – CSc in Technical Sciences, Research, e-mail: [ivpan@mi-perm.ru](mailto:ivpan@mi-perm.ru), [ID 0000-0001-8157-8426](https://orcid.org/0000-0001-8157-8426)  
Vitaly S. Kuzminykh – Engineer, e-mail: [vskuzminykh@mail.ru](mailto:vskuzminykh@mail.ru), [ID 0000-0002-8053-0786](https://orcid.org/0000-0002-8053-0786)  
Ivan A. Morozov – PhD Student, e-mail: [imorozov.work@yandex.ru](mailto:imorozov.work@yandex.ru), [ID 0000-0002-6513-1293](https://orcid.org/0000-0002-6513-1293)



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)



## THE METHODOLOGICAL ASPECTS OF STRENGTH, DEFORMATION AND ENERGY CHARACTERISTIC DETERMINATION OF SALT ROCKS UNDER DIRECT TENSILE LOADING OF ROCK SPECIMENS IN LABORATORY CONDITIONS

V.A. Asanov<sup>1</sup>, I.L. Pankov<sup>1</sup>, V.S. Kuzminyh<sup>2</sup>, I.A. Morozov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

### ARTICLE INFO

Received: 17 July 2018  
Accepted: 06 December 2018  
Published: 28 December 2018

#### Keywords:

tensile strength, failure strain, deformation modulus, specific deformation energy, salt rocks, rocks, direct tensile, uniaxial compression, numerical modeling, Brazilian method.

### ABSTRACT

Mineral deposit development is impossible without suitable data about mineral and parting properties. Underground facilities and construction stability depend on how rocks can resist increased loads appearing due to overburden load redistribution during mineral development. Tensile stresses usually cause stability losses. One of the main information sources for mining design is a laboratory investigation of rock specimens behavior under various loadings. The work aims to create the approaches of strength, deformation and energy determination of salt rocks under direct tensile load in laboratory conditions. The studies are carried in the salt rocks of the Verchnekamskoe potash and magnesium deposit.

The main direct tensile problems of rock specimens have been analyzed at laboratory conditions. The comparative direct tensile result analysis of salt rocks has been performed depending on the specimen geometry. Based on the laboratory and numerical experiments, the specimen geometry has been suggested considering the stress state mode arising under loading process, grain size, bracing influence. A material has been suggested to enable a good specimen bracing in caps. It has good adhesion both with a salt specimen and with steel surface of a cup. The center device is developed to provide a good coaxial specimen bracing in cups. Also the device is developed to write the axial specimen deformation directly at test section by the three console type transducers set by the scheme of the equilateral triangle; and increases the reliability of the experiment.

The obtained results determine the mechanical salt rock characteristics of the Verchnekamskoe potash and magnesium deposit under direct tensile loading.

© PNRPU

### Введение

Неотъемлемой составляющей геомеханической безопасности разработки месторождений полезных ископаемых является адекватное представление о поведении неоднородных, гетерогенных систем: породных массивов, грузонесущих элементов подземных объектов и сооружений. Устойчивость горных выработок зачастую определяется достоверностью определения физико-механических характеристик: прочностных и деформационных. Способность породы сопротивляться действующей нагрузке главным образом характеризуется величинами предела прочности при сжатии и растяжении. Особый интерес с точки зрения влияния на устойчивость краевых частей подработанного массива вызывают исследования деформационных процессов при растяжении [1]. Известно, что отношение предела прочности на сжатие к пределу прочности на растяжение горных пород колеблется от 5 до 30 [2], по данным [3], может достигать 40, для ряда пород изменяться от 2,7 до 50 [4]. Ввиду малого значения прочности при растяжении именно растягивающие, а не сжимающие напряжения являются причиной нарушения нормальных условий эксплуатации подземных горных выработок вследствие обрушения пород кровли.

Принципиально методы определения растягивающей прочности можно разделить на две группы: прямые и косвенные. Косвенные, в свою очередь, делятся [5]:

- на методы раскалывания (раздавливания) сжимающими нагрузками;
- методы изгиба;
- методы разрыва давлением изнутри.

Наиболее распространенным методом определения прочности при растяжении горных пород является метод разрушения цилиндрических образцов сжатием по образующей (ГОСТ 21153.3–85 «Методы определения предела прочности при одноосном растяжении»), более известный в мировой практике как Бразильский метод, сформулированный как основной косвенный метод в [6]. Суть метода заключается в том, что вдоль диаметра цилиндрического/дискообразного образца прикладывается сжимающая нагрузка. В центральной части образца возникают растягивающие напряжения, инициирующие разрушение породного диска. Картина распределения напряжений имеет существенно неоднородный характер [7, 8] и определяется способом передачи образцу сжимающей нагрузки: непосредственно плоскими поверхностями плит пресса (ГОСТ 21153.3–85); зажимными губками либо стержнями специальной формы [6, 7]. Очевидно, что в зависимости от способа приложения нагрузки и как следствие распределения

напряжений получаемое значение косвенной растягивающей прочности будет изменяться для одной и той же породы в достаточно широких пределах [7]. Более того, авторы [7] отмечают, что разрушение ряда горных пород, например туфа, при определенных условиях нагружения дискообразных образцов, имеет дробящий динамический характер, что не характерно для испытаний на прямое растяжение. Это явление авторы объясняют недостаточной жесткостью испытательной машины. Исследования показывают, что прочность при косвенном растяжении Бразильским методом зависит не только от способа приложения нагрузки, но и от скорости ее приложения, структурно-текстурных особенностей (зернистости, слоистости, трещиноватости и пр.) породы, температуры, формы образца (отношения диаметра диска к его толщине) [9–15].

Среди методов изгиба наиболее распространенными являются методы трехточечного и четырехточечного изгиба образцов в виде балочек прямоугольного либо кругового поперечного сечения. Сосредоточенная нагрузка в случае нагружения по трехточечной схеме прикладывается в средней части пролета балочки, в то время как при четырехточечной схеме – в двух точках, симметричных по отношению к центру расчетного пролета балки. Более подробно методы изгиба балок рассмотрены в работах [15, 16], а также [17, 18]. Многие исследователи отмечают, что значения предельного растягивающего напряжения при трехточечном изгибе выше, чем при четырехточечном. Экспериментальные данные показывают, что это справедливо не всегда [15]. Деформирование при изгибе даже хрупких горных пород имеет неупругий характер, тем самым существенно осложняя интерпретацию экспериментальных данных. Механизмы разрушения породных образцов при изгибе определяются не только характеристиками самой породы, но и размером (объемом) образца, а также способом и скоростью приложения нагрузки [15–18]. Методы разрыва давлением изнутри ввиду специфических особенностей эксперимента и ограниченности применения в данной работе не рассматриваются. Более подробно с ними можно ознакомиться, например, в [5].

В отдельную группу методов можно выделить методы оценки прочности на растяжение по результатам испытаний на сжатие. Так, в работе [19] предлагается определять прочность на растяжение хрупких пород по данным одноосного сжатия. Предлагаемый в [19] подход основан на том, что в процессе сжатия хрупкого материала при определенной нагрузке в нем формируется и с увеличением нагрузки распространяется трещина растяжения вплоть до полного разрушения образца. Растягивающая прочность определяется по величине напряжения, при котором в образце происходит зарождение трещины растяжения. Уровень напряжений, при котором появляется трещина, предлагается определять по данным акустической эмиссии и/или началу процесса дилатансии. Данный подход имеет ряд существенных недостатков. Диаграмма деформирования хрупких гор-

ных пород зачастую имеет «пилообразный» характер, проявляющийся в ограниченных сбросах нагрузки вследствие локальных микроразрушений даже на начальном этапе нагружения. При этом отнесение породы к категории «хрупких» носит субъективный характер. В зависимости от структурно-текстурных особенностей материала, трещиноватости, формы и размеров образцов, скорости нагружения, жесткости испытательной системы и т. д. упрочнение одной и той же породы может носить как чисто упругий характер, вплоть до потери несущей способности, так и неупругий [2, 5, 19, 20, 21]. Авторы [22] предлагают определять предел прочности на растяжение по огибающей кругов Мора, получаемой по результатам испытаний образцов на одноосное и объемное сжатие. Критерий прочности Мора предполагает, что доминирующий механизм разрушения материала носит сдвиговой характер. Но, как известно [23], разрушение горных пород имеет более сложную природу. Одна и та же порода в разных режимах нагружения способна разрушаться как с преобладанием сдвиговых механизмов, так и растягивающих. Авторами [22] не указываются границы применимости предлагаемого подхода. Для апробации метода рассматривается достаточно специфический случай пород, обладающих высокими прочностными и упругими характеристиками, и не исследуются породы, обладающие отличными механизмами деформирования при нагружении.

Все рассмотренные методы при относительно простой реализации обладают целым рядом существенных недостатков. Косвенные методы позволяют проводить лишь грубую оценку прочности при растяжении. Но даже для грубой оценки требуется всестороннее исследование породы, и порой результаты различных косвенных методов не только несопоставимы между собой, но также несопоставимы с результатами прямых испытаний [4, 7, 13–16, 19, 22, 24, 25]. Основной задачей рассмотренных косвенных методов является оценка только прочности при растяжении. При этом другие механические характеристики растягивающего нагружения, такие как энергоемкость деформирования, разрушающая деформация, модуль деформации, модуль упругости и др., получить либо не удастся, либо необходимо использовать иные подходы. Для практического применения полученных результатов зачастую требуется проведение сопоставительных экспериментов по прямому растяжению, что, вообще говоря, ставит под сомнение целесообразность косвенных исследований.

Испытания на прямое растяжение – это эталонные исследования, направленные на определение прочностных и деформационных растягивающих характеристик. Существующие методические рекомендации к проведению данного типа испытаний, изложенные в [2, 5, 6], а также в ГОСТ 21153.3–85 носят общий характер и не дают определенных рецептов для решения практических вопросов, возникающих в ходе лабораторных исследований конкретной породы. В основном существу-

ющие исследования по прямому растяжению, в том числе [7, 26], сконцентрированы на изучении прочных хрупких пород. При этом практически полное отсутствие данных по прямому растяжению соляных пород делает настоящее исследование особенно актуальным.

Целью работы является формирование основных методических подходов к определению прочностных, деформационных и энергетических характеристик при прямом растяжении в лабораторных условиях соляных пород Верхнекамского месторождения калийно-магневых солей. Верхнекамское месторождение расположено на северо-востоке Пермского края и приурочено к центральной части Соликамской впадины Предуралья Краевого прогиба [27]. Месторождение представляет собой линзовидную залежь, сложенную подстилающей галитовой, сильвинитовой, карналлитовой и покровной галитовой толщами. Соляные пласты имеют субгоризонтальное залегание, осложненное складками различных порядков [28]. Сегодня разработка продуктивных сильвинитовых и карналлитовых пластов ведется на глубинах порядка 300–400 м пятью рудоуправлениями. Пройдены стволы еще одного рудника. Интенсификация добычи руды на территории месторождения предполагает постоянное совершенствование имеющихся и разработку новых методов исследования физико-механических характеристик соляных пород.

## 1. Оборудование и материалы

Исследование на прямое растяжение проводилось в Центре изучения свойств геоматериалов Пермского национального исследовательского политехнического университета на универсальной испытательной машине Zwick Z050 (рис. 1) на образцах, изготовленных из монолитов сильвинита равномерно-зернистой структуры и слоистой текстуры, отобранных из стенок выемочного штрека 15-го блока 17-й панели рудника СКРУ-3. Глубина отбора – 350 м. Средний размер зерен сильвинита не превосходит 3–5 мм.



Рис. 1. Проведение эксперимента на прямое растяжение

Fig. 1. The direct tension experiment

Пресс Zwick Z050 представляет собой высокоточную сервоуправляемую испытательную машину с предельным осевым усилием на растяжение/сжатие 50 кН. Точность измерения осевого усилия составляет  $\pm 5$  Н, перемещений подвижной траверсы  $\pm 5$  мкм.

Установка позволяет регулировать скорость нагружения в диапазоне от 0,001 до 100 мм/мин. Для измерения продольных (осевых) деформаций образца в рабочей (средней) части машина оснащена тремя консольными датчиками индуктивного типа точностью  $\pm 0,5$  мкм. Надежная соосная фиксация стальных обжимов с образцом в установке обеспечивается клиновыми захватами, предназначенными для зажима как плоских, так и круглых (цилиндрических) образцов.

## 2. Проведение экспериментов

### 2.1. Лабораторные эксперименты

Для многих искусственных материалов предпочтительной формой образцов для проведения экспериментов по прямому растяжению является галтелеобразная форма, при которой рабочая часть образца выполняется в виде утонения. Изготовление образцов столь сложной конфигурации из слабых соляных пород связано со значительными сложностями. При этом данные [29] показывают, что при прямом растяжении такие образцы зачастую разрушаются в местах концентрации напряжений – в районе заделки. Образец должен иметь максимально простую форму. Необходимо учесть, что для уменьшения влияния размера зерна на значения определяемых механических характеристик отношение площади поперечного сечения образца к площади поперечного сечения зерна должно быть не менее 15 [29]. Высота образца должна обеспечивать не только достаточный размер рабочей части [29], но и достаточную область для надежной фиксации в обжимах. Для минимизации влияния заделки торцов на напряженно-деформированное состояние рабочей части отношение высоты к ширине образца должно быть максимально возможным. Очевидно, что изготовление образцов слишком больших размеров повлечет за собой необоснованный расход породного материала, что зачастую является невозможным. Чрезмерное увеличение размеров соляных образцов может приводить к снижению механической прочности вследствие проявления масштабного эффекта [30], а также повышает вероятность разрушения образца еще на этапе изготовления.

Из отобранных сильвинитовых монолитов на специальном камнерезном оборудовании без использования промывочной жидкости изготавливались образцы двух типов: 1) призматические образцы размером  $250 \times 50 \times 50$  мм (рис. 2, а); 2) образцы из призматических заготовок размером  $250 \times 50 \times 50$  мм путем срезания ребер призмы в рабочей части (рис. 2, б). Поперечное сечение образцов второго типа в рабочей части – это правильный восьмиугольник со стороной 25 мм. Длина рабочей части составляет 110 мм.

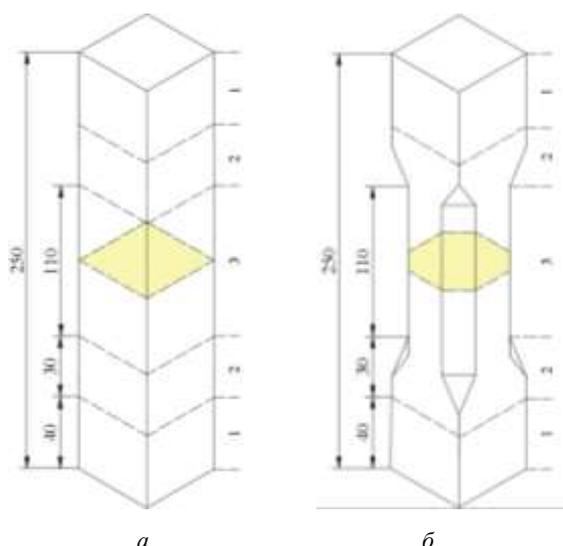


Рис. 2. Геометрия образца и конфигурация поперечного сечения: *a* – 1-го типа; *б* – 2-го типа; 1 – область заделки; 2 – переходная область; 3 – рабочая часть

Fig. 2. The specimen geometry and configuration of the cross-section: (a) 1<sup>st</sup> type; (b) 2<sup>nd</sup> type; 1) fixation area; 2) transitional area; 3) test section



Рис. 3. Устройство для центрирования стальных обойм относительно оси образца  
Fig. 3. The device for centering the steel caps relative to the specimen axis

Ввиду низкой контактной прочности соляных пород непосредственная фиксация образца в захватах испытательной машины невозможна. Передача растягивающего усилия на образец обеспечивалась за счет специально изготовленных стальных обойм – толстостенных труб с внутренним диаметром и высотой, достаточными для надежной фиксации образца. Нижняя часть обоймы предусматривает установку стальной крышки, снабженной цилиндрическим хвостовиком для фиксации обоймы в клиновых захватах нагружающей машины и передачи растягивающего усилия на образец. Особое внимание уделялось выбору цементирующего состава для фиксации образца в обоймах. Требования, выдвигаемые для скрепляющего состава: хорошая адгезия как с сильвинитовым образцом, так и со стальной поверхностью обойм; высокие прочностные и деформационные характеристики; легкость в приготовлении и использовании; доступность; минимальная токсичность. Наиболее полно этим требованиям удовлетворяет магнезиально-фосфатный цемент, применяемый для цементации нефтяных скважин, пробуренных через соленосные горизонты Верхнекамского калийно-магниевого месторождения [31]. Соосность фиксации образца магнезиальным цементом в стальных обоймах обеспечивалась с помощью специально разработанного центрирующего устройства (рис. 3).

После полного затвердевания цемента для исключения влияния влажности на экспериментальные данные образец вместе с обоймами помещался в сушильный шкаф и выдерживался при температуре 70 °С до достижения постоянной массы. Подготовленный образец устанавливался в испытательную машину Zwick Z050 (см. рис. 1).

Перед испытанием для каждого образца определялись динамические модуль упругости и коэффициент Пуассона по методике, изложенной в [32]. Образцы с резко отличающимися упругими характеристиками отбраковывались. Также отбраковывались образцы с визуально отличными от общей выборки структурно-текстурными особенностями, дефектами, повреждениями. Нагружение выполнялось с постоянной скоростью деформирования  $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  на базе 110 мм до полного разрушения. Всего было испытано 24 образца. В процессе испытания велась запись продольного усилия, положения траверса, а также показаний трех датчиков продольной деформации консольного типа, установленных по схеме равностороннего треугольника. Все указанные показатели выводились в режиме реального времени на экран монитора. По результатам экспериментов для каждого образца строилась диаграмма деформирования в координатах «продольное напряжение-относительная продольная деформация» ( $\sigma_1$ - $\varepsilon_1$ ). На рис. 4 представлены диаграммы деформирования и фотографии соответствующих образцов 1-го типа после испытания: *a, б* – вдоль слоистости; *в, г* – поперек слоистости. Ввиду ограниченного объема статьи все диаграммы не приводятся.

По результатам экспериментов, по методике, изложенной в [33], определялся комплекс механических показателей (рис. 5): предел прочности ( $\sigma_{1str.}$ , МПа, временное сопротивление разрушению) – предельное напряжение, которое способен воспринимать образец в данных условиях нагружения; разрушающая продольная деформация ( $\varepsilon_{1str.}$ , %) – продольная деформация, соответствующая пределу прочности; касательный модуль допределельной деформации ( $M_1$ , ГПа) – тангенс угла наклона линейной части допределельной ветви диаграммы деформирования к оси абсцисс (деформации); касательный модуль запределельной деформации ( $M_2$ , ГПа) – тангенс угла наклона линейной части запределельной ветви диаграммы деформирования к оси абсцисс (деформации); удельная энергоемкость деформирования на пределе прочности ( $W$ , кДж/м<sup>3</sup>) – площадь,

заключенная между диаграммой деформирования и осью абсцисс. Результаты экспериментального исследования представлены в табл. 1, 2.

На рис. 6 представлена характерная диаграмма деформирования и соответствующие фотографии образца 2-го типа до и после испытания.

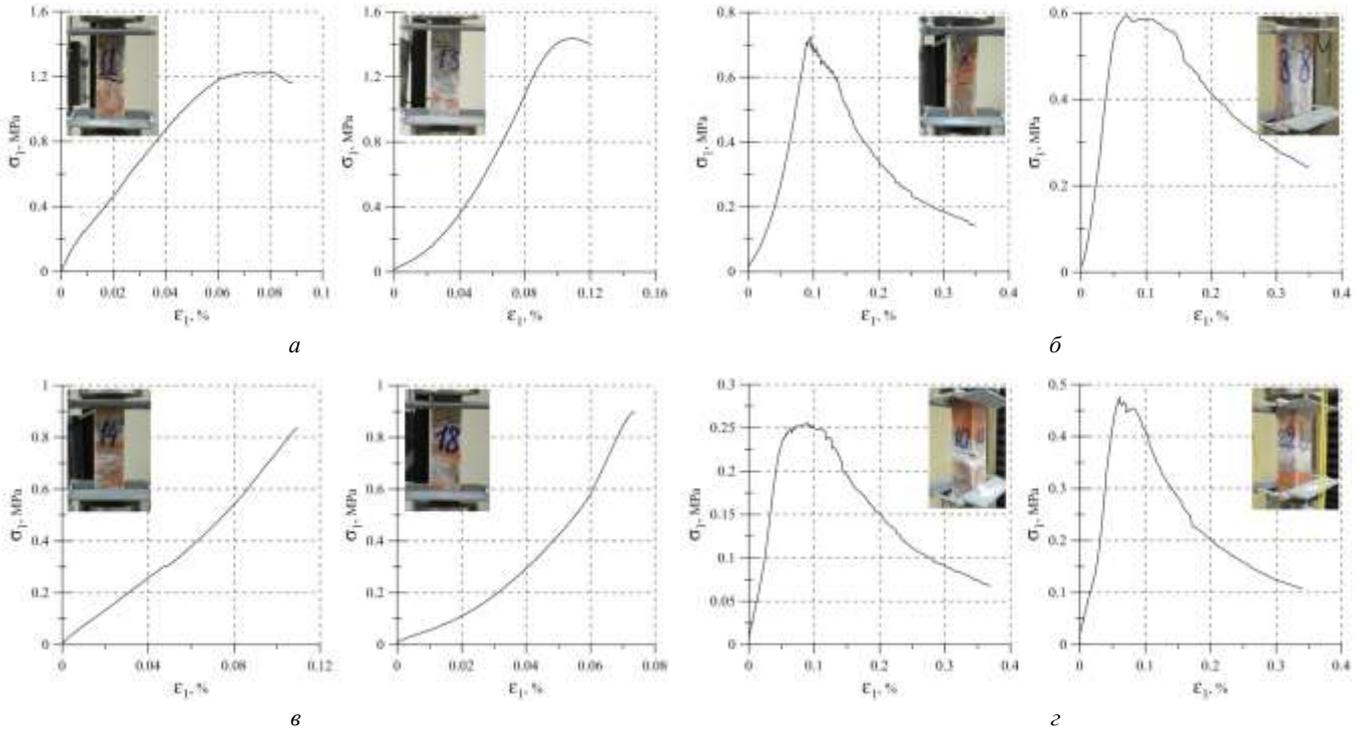


Рис. 4. Диаграммы деформирования и фотографии соответствующих образцов 1-го типа после испытания: *a* – вдоль слоистости без запредельной характеристики; *b* – вдоль слоистости с запредельной характеристикой; *c* – поперек слоистости без запредельной характеристики; *d* – поперек слоистости с запредельной характеристикой

Fig.4. The stress-strain curves and photographs of the 1<sup>st</sup> type specimens after testing: *a* – along the bedding without post-peak characteristics; *b* – along the bedding with post-peak characteristics; *c* – perpendicular to the bedding without post-peak characteristics; *d* – perpendicular to the bedding with post-peak characteristics

По данным сопоставительных испытаний образцов 2-го типа вдоль слоистости предел прочности, разрушающая продольная деформация, касательный модуль допредельной деформации, удельная энергоёмкость деформирования на пределе прочности составляют 0,92 МПа, 0,12 %, 1,17 ГПа, 0,51 кДж/м<sup>3</sup> соответственно.

Таблица 1

Результаты испытаний на прямое растяжение вдоль слоистости образцов 1-го типа сильвинита Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей

Table 1

The 1<sup>st</sup> type specimen testing results of the Verchnekamskoe potash and magnesium salts deposit of under direct tensile loading along the bedding

Номер образца	$\sigma_{1str.}$ , МПа	$\epsilon_{1str.}$ , %	$M_1$ , ГПа	$M_2$ , ГПа	$W$ , кДж/м <sup>3</sup>
1	1,06	0,09	1,36	–	0,61
2	0,63	0,11	1,36	–	0,34
3	1,15	0,17	1,27	–	0,64
4	1,27	0,07	2,33	–	0,39
5	1,58	0,15	1,35	–	1,00
6	2,09	0,15	2,00	–	1,34
7	0,73	0,10	1,20	0,28	0,29
8	0,59	0,07	1,27	0,15	0,24
9	1,52	0,15	1,46	–	1,06
11	1,22	0,08	2,01	–	0,63
12	1,05	0,07	1,77	–	0,33
13	1,44	0,11	1,93	–	0,73
16	1,37	0,16	1,72	–	0,78
Среднее значение	1,21	0,11	1,62	–	0,64
Коэффициент вариации, %	34,58	33,44	22,46	–	52,14

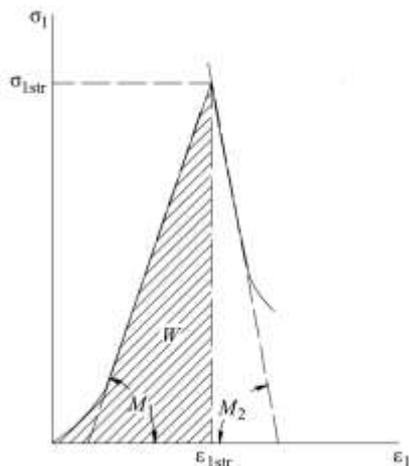


Рис. 5. Схема определения значений показателей механических свойств по диаграмме деформирования

Fig. 5. The scheme for mechanical property values according to the stress-strain curve

Таблица 2

Результаты испытаний на прямое растяжение поперек слоистости образцов 1-го типа сильвинита Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей

Table 2

The 1<sup>st</sup> type specimen testing results of Verhnekamskoe potash and magnesium deposit sylvinitе under direct tensile loading perpendicular to the bedding

Номер образца	$\sigma_{1str.}$ , МПа	$\epsilon_{1str.}$ , %	$M_1$ , ГПа	$M_2$ , ГПа	$W$ , кДж/м <sup>3</sup>
10	0,25	0,09	0,61	0,09	0,16
14	0,84	0,09	1,14	-	0,35
15	1,01	0,14	0,93	-	0,69
17	0,54	0,07	1,05	-	0,23
18	0,90	0,07	1,75	-	0,28
22	0,48	0,06	1,20	0,26	0,14
Среднее значение	0,67	0,09	1,11	-	0,31
Коэффициент вариации, %	34,61	35,79	28,42	-	68,47

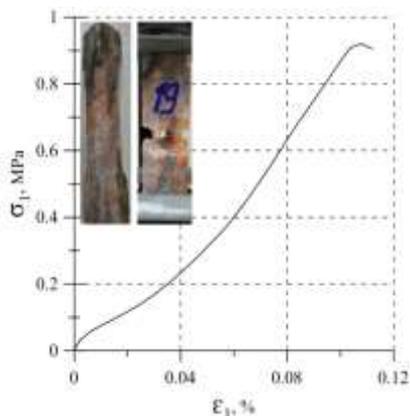


Рис. 6. Характерная диаграмма деформирования и соответствующие фотографии образца

2-го типа до и после испытания вдоль слоистости  
Fig. 6. The typical stress-strain curve of the 2<sup>nd</sup> type specimen and its photographs before and after the testing along the bedding

## 2.2. Численные эксперименты

Методом конечных элементов был выполнен анализ напряженно-деформированного состояния образцов 1-го и 2-го типов. Геометрия стальных обойм и цементной заделки соответствовала геометрии лабораторных экспериментов. Задача решалась в упругой постановке. Образец моделировался однородной изотропной средой. Упругие характеристики материалов, использованные в расчете, представлены в табл. 3.

Характеристики стали 40ХЛ, использованной при изготовлении стальных обойм, приняты по данным [34]. В качестве значения модуля упругости сильвинита была принята величина секущего модуля деформации, которая определялась как среднее значение по данным испытания всех образцов. Секущий модуль деформации

образца – это отношение предела прочности образца к его разрушающей продольной деформации. Коэффициент Пуассона сильвинита принят на основании данных [20]. Для определения модуля упругости и коэффициента Пуассона магнезиально-фосфатного цемента было изготовлено 6 цилиндрических цементных образцов диаметром 46 мм и высотой 92 мм. Цементные образцы испытывались в универсальном сервогидравлическом испытательном комплексе MTS-815 на одноосное сжатие с постоянной скоростью деформирования  $1,7 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  и разгрузкой по величине напряжения, составляющей 0,4–0,5 предела прочности. Предельное сжимающее усилие, развиваемое MTS-815, составляет 1600 кН; жесткость рамы  $7 \cdot 10^9 \text{ Н/м}$ . В ходе эксперимента велась запись продольного усилия, положения траверса, а также продольных и поперечных деформаций образца. Продольные и поперечные деформации фиксировались до точки повторного нагружения высокоточными датчиками MTS 632.90F-04 и 632.92H-03 соответственно.

Таблица 3

Упругие характеристики материалов

Table 3

The elastic characteristics of materials

Материал	Модуль упругости, ГПа	Коэффициент Пуассона
Сталь 40ХЛ	$2,19 \cdot 10^2$	0,29
Сильвинит	0,90	0,38
Магнезиально-фосфатный цемент	9,90	0,09

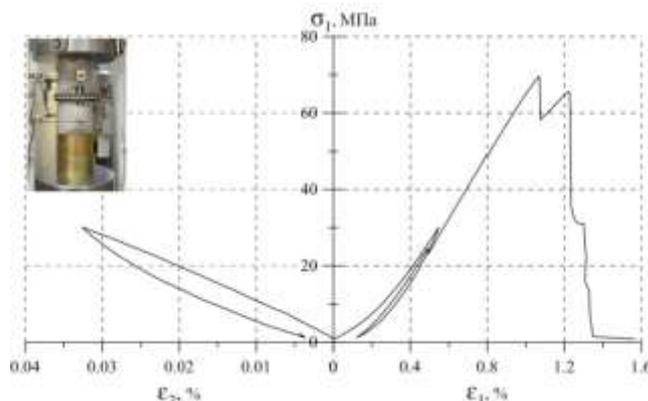


Рис. 7. Характерная диаграмма деформирования образца магнезиального цемента при сжатии

Fig. 7. The typical stress-strain curve of magnesia cement specimen under compression

Численные эксперименты по прямому растяжению выполнялись в трехмерной симметричной постановке для ¼ полноразмерной модели. Перемещения основания нижней обоймы – запрещены. Основанию верхней обоймы сообщалось перемещение вдоль положительного направления оси Z. На рис. 8 показаны результаты численных экспериментов для образцов 1-го и 2-го типов

соответственно. Пропорции образцов соблюдены. Слева от штрих-пунктирной линии показаны поля продольных напряжений для внешней грани образца, справа – для продольного сечения, проходящего через ось симметрии образца и центры противоположных граней.

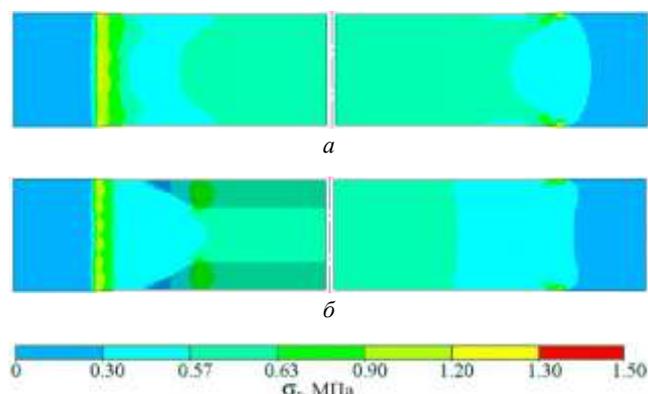


Рис. 8. Поля продольных напряжений: *a* – для образца 1-го типа; *b* – для образца 2-го типа

Fig. 8. The axial stress distributions: *a* – for the 1<sup>st</sup> type specimen; *b* – for the 2<sup>nd</sup> type specimen

По результатам испытаний цементных образцов строились диаграммы деформирования в координатах «продольное напряжение-относительная продольная деформация-относительная поперечная деформация» (см. рис. 7) и по разгрузочной ветви определялись упругие характеристики (см. табл. 3).

### 3. Анализ результатов

Лабораторные исследования по прямому растяжению образцов сильвинита призматической формы (см. рис. 2, *a*) вдоль и поперек слоистости и образцов с формой, представленной на рис. 2, *b* вдоль слоистости, показали отсутствие явных отличий в механизме разрушения. Как в том, так и в другом случае для большинства образцов деформирование в процессе нагружения носило характер, близкий к линейному. Потеря несущей способности обуславливалась быстрым прорастанием магистральной трещины в центральной части образца перпендикулярно его оси (см. рис. 4, *a*, *b*). Анализ экспериментальных данных (см. табл. 1, 2) показал, что сильвинитовые образцы, испытанные вдоль слоистости, обладают существенно более высокими значениями механических характеристик. Предел прочности, разрушающая продольная деформация, касательный модуль допредельной деформации при прямом растяжении сильвинитовых образцов 1-го типа вдоль слоистости в 1,8; 1,2; 1,5; 2,1 раза больше соответствующих характеристик, полученных по результатам испытания образцов 1-го типа поперек слоистости. По результатам испытания ряда образцов 1-го типа как вдоль, так и поперек слоистости удалось получить запредельную характеристику (см. рис. 4, *b*, *c*) – касательный модуль запредельной деформации (см. табл. 1, 2, образцы 7, 8 и 10, 22 соот-

ветственно). Сопоставительные исследования на галтелеобразных образцах показали, что образцы 2-го типа, испытанные на прямое растяжение вдоль слоистости, дают несколько заниженные значения механических характеристик. При всех типах испытаний наблюдается большая вариация полученных значений, что является характерной особенностью экспериментального исследования свойств зернистых слоистых соляных пород. Наибольшая вариация наблюдается при определении удельной энергоёмкости деформирования на пределе прочности ввиду интегральной природы данного показателя.

Результаты численного моделирования (см. рис. 8) показывают, что для образцов как 1-го, так и 2-го типа в центральной части возникает напряженное состояние, близкое к однородному. На рис. 8 видны незначительные концентрации напряжений в местах заделки образцов, а также в местах с резкими изменениями геометрии (рис. 8, *b*), что, возможно, и стало причиной более низких значений показателей механических свойств для образцов 2-го типа.

### Заключение

В работе представлен обзор основных косвенных методов определения предела прочности на растяжение горных пород в лабораторных условиях. Приведены результаты лабораторных исследований по прямому растяжению сильвинита Верхнекамского калийно-магниевого месторождения. Представлены результаты численных экспериментов по прямому растяжению сильвинитовых образцов. Выполнен сопоставительный анализ результатов, полученных по данным испытания призматических образцов вдоль и поперек слоистости и призматических образцов со срезанными в рабочей части ребрами, испытанными вдоль слоистости. Ввиду более низких значений механических показателей при испытании поперек слоистости необходимо уделять особое внимание оценке устойчивости кровли горных выработок – зоне концентрации растягивающих напряжений. Лабораторные эксперименты показали, что образцы со срезанными ребрами дают несколько заниженные значения механических характеристик, а также, по данным численных экспериментов, имеют больше областей – концентраторов напряжений. В ряде случаев, при испытании призматических образцов как вдоль слоистости, так и поперек слоистости, удалось получить запредельную часть диаграммы деформирования, что не характерно для прямого растяжения горных пород. Проведенный анализ показал, что наличие запредельного участка в первую очередь связано с низкими прочностными свойствами соляных пород на растяжение и как следствие с низким уровнем упругой энергии, запасенной в системе «испытательная машина-образец», что и определяет вязкий или хрупкий режим разрушения горных пород. Для образцов рассмотренных конфигу-

раций разрушение наблюдалось в центральной части в большинстве случаев.

Ввиду отсутствия явного преимущества образцов со срезанными ребрами для лабораторных исследований соляных пород на прямое растяжение рекомендуется использовать образцы призматической формы высотой 250 мм, что обеспечивает достаточный размер области, свободной от заделки, с напряженным состоянием, близким к однородному, и поперечным сечением 50×50 мм, что исключает влияние размеров зерен на данные лабораторных экспериментов. Испытание образцов больших размеров приведет к нецелесообразному расходу породного материала, а также возможному искажению экспериментальных данных вследствие проявления масштабного эффекта. В качестве состава для фиксации торцов образца в обоймах рекомендуется использовать магнезиально-фосфатный цемент, обладающий хорошей адгезией как со стальной поверхностью обойм, так и с соляным образцом. Заливку образца цементом в стальные обоймы необходимо выполнять в центрирующих устройствах либо непосредственно в захватах испытательной машины для исключения возникновения изгибающего момента

вследствие нарушения соосности стальных обойм. Для снижения уровня концентрации напряжений в месте выхода образца из заделки целесообразно выполнять цементные отливки высотой 5–7 мм.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-05-00371 А). Испытания проведены с использованием оборудования ЦКП «Центр изучения свойств геоматериалов» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

## Acknowledgement

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No. 18-05-00371 A). The tests were carried out using the equipment of the Center for Studying the Properties of Geomaterials of the Perm National Research Polytechnic University.

## Библиографический список

1. Особенности локализации деформации при растяжении силвинита / И.А. Пантелеев [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2015. – № 2. – С. 127–138.
2. Прочность и деформируемость горных пород / Ю.М. Карташов [и др.] – М.: Недра, 1979. – 269 с.
3. Паньков И.Л., Гараева Ю.И. Исследование механических свойств соляных пород при растяжении // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 9. – С. 154–157.
4. Cai M. Practical Estimates of Tensile Strength and Hoek–Brown Strength Parameter  $m_i$  of Brittle Rocks // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2010. – Vol. 43. – No. 2. – P. 167–184. DOI: 10.1007/s00603-009-0053-1.
5. Свойства горных пород и методы их определения / Е.И. Ильницкая [и др.]. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
6. ISRM. International society for rock mechanics. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials // Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr. – 1978. – Vol. 15. – P. 99–103.
7. Erarslan N., Williams D.J. Experimental, numerical and analytical studies on tensile strength of rocks // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2012. – Vol. 49. – P. 21–30.
8. Ye Jianhong, Wu F.Q., Sun J.Z. Estimation of the tensile elastic modulus using Brazilian disc by applying diametrically opposed concentrated loads // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2009. – Vol. 46. – P. 568–576.
9. Experimental investigations on loading-rate dependency of compressive and tensile mechanical behaviour of hard rocks / Hui Zhou, Yanshuang Yang, Chuanqing Zhang, Dawei Hua // European Journal of Environmental and Civil Engineering. – 2015. – Vol. 19. – No. 1. – P. 70–82. DOI: 10.1080/19648189.2015.1064621.
10. Sopon Wisetsaen, Chaowarin Walsri, Kittitap Fuenkajorn. Effects of loading rate and temperature on tensile strength and deformation of rock salt // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2015. – Vol. 73. – P. 10–14.
11. Effects of micro-structure and micro-parameters on brazilian tensile strength using flat-joint model / Xueliang Xu, Shunchuan Wu, Yongtao Gao, Miaofei Xu // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2016. – Vol. 49. – No. 9. – P. 3575–3595. DOI: 10.1007/s00603-016-1021-1.
12. Abbass Tavallali, André Vervoort. Behaviour of layered sandstone under Brazilian test conditions: layer orientation and shape effects. // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2013. – Vol. 5. – No. 5. – P. 366–377.
13. Rafiei Renani H., Martin C.D. The direct and Brazilian tensile strength of rock in the light of size effect and bimodality // 48th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2014: Rock Mechanics Across Length and Time Scales: conference paper. – USA, Minneapolis, Minnesota, 2014 – P. 1052–1060.
14. Tolooiyan A., Mackay R., Xue J. Measurement of the Tensile Strength of Organic Soft Rock // Geotechnical Testing Journal. – 2014. – Vol. 37. – No. 6. – P. 991–1001. DOI: 10.1520/GTJ20140028.
15. Efimov V.P. The rock strength in different tension conditions // Journal of Mining Science. – 2009. – Vol. 45. – No. 6. – P. 569–575. DOI: 10.1007/s10913-009-0071-0.
16. Efimov V.P. Rock tests in nonuniform fields of tensile stresses // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2013. – Vol. 54. – No. 5. – P. 857–865. DOI: 10.1134/S0021894413050192.
17. Mehdi Galouei, Ali Fakhimi. Size effect, material ductility and shape of fracture process zone in quasi-brittle materials // Computers and Geotechnics. – 2015. – Vol. 65. – P. 126–135.
18. Dynamic fracture experiments of mortar using a high-speed loading apparatus driven by explosives / Yuichi Nakamura, Sang Ho Cho, Katsuhiko Kaneko, Shoji Kajiki, Yoshio Kiritani // Science and Technology of Energetic Materials. – 2012. – Vol. 41. – No. 5. – P. 136–141.
19. Cai M. Practical Estimates of Tensile Strength and Hoek–Brown Strength Parameter  $m_i$  of Brittle Rocks // Rock Me-

chanics and Rock Engineering. – 2010. – Vol. 43. – No. 2. – P. 167–184. DOI: 10.1007/s00603-009-0053-1.

20. Барях А.А., Константинова С.А., Асанов В.А. Деформирование соляных пород. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1996. – 203 с.

21. Ali Fakhimi, Behzad Hemami. Axial splitting of rocks under uniaxial compression // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. – 2015. – Vol. 79. – P. 124–134.

22. Estimation of strength properties of rock samples in terms of calculated Mohr's envelopes / V.M. Zhigalkin, B.A. Rychkov, O.M. Usol'tseva [et al.] // Journal of Mining Science. – 2011. – Vol. 47. – No. 6. – P. 714–721. DOI: 10.1134/S1062739147060025.

23. Ставрогин А.Н., Тарасов Б.Г. Экспериментальная физика и механика горных пород. – СПб: Наука, 2001. – 343 с.

24. Асанов В.А., Паньков И.Л., Евсеев В.С. Оценка прочностных и деформационных свойств соляных пород при растяжении // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2010. – № 12. – С. 65–66.

25. Паньков И.Л., Гущина К.С., Богданова А.С. Результаты комплексного определения прочностных и деформационных свойств соляных пород при растяжении // Горное эхо. – 2012. – № 3. – С. 15–18.

26. Baoyun Zhao, Dongyan Liu, Qian Dong. Experimental research on creep behaviors of sandstone under uniaxial compressive and tensile stresses // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2011. – Vol. 3. – Supp. No. 1. – P. 438–444.

## References

1. Panteleev I.A., Plekhov O.A., Naimark O.B., Evseev A.V., Pankov I.L., Asanov V.A. Osobennosti lokalizatsii deformatsii pri rastiazhenii sil'vinita [Features of strain localization in sylvinit under tension]. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2015, no. 2, pp. 127-138.

2. Kartashov Yu.M., Matveyev B.V., Mikheyev G.V., Fadeyev A.B. Prochnost' i deformiruemost' gornyx porod [Strength and deformability of rocks]. *Moscow, Nedra*, 1979, 269 p.

3. Pankov I.L., Garayeva Yu.I. Issledovanie mekhanicheskikh svoystv solianykh porod pri rastiazhenii [Investigation of mechanical properties of salt rocks under tension]. *Mining Information and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*, 2011, no. 9, pp. 154-157.

4. Cai M. Practical Estimates of Tensile Strength and Hoek-Brown Strength Parameter  $m_i$  of Brittle Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, vol. 43, no. 2, pp. 167-184. DOI: 10.1007/s00603-009-0053-1.

5. Ilnitskaya Ye.I., Teder R.I., Vatolin Ye.S., Kuntyshev M.F. Svoystva gornyx porod i metody ikh opredeleniia [Properties of rocks and methods for their determination]. *Moscow, Nedra*, 1969, 392 p.

6. ISRM. International society for rock mechanics. Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, 1978, vol. 15, pp. 99-103.

7. Erarslan N., Williams D.J. Experimental, numerical and analytical studies on tensile strength of rocks. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2012, vol. 49, pp. 21-30.

8. Ye Jianhong, Wu F.Q., Sun J.Z. Estimation of the tensile elastic modulus using Brazilian disc by applying diametrically opposed concentrated loads. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2009, vol. 46, pp. 568-576.

9. Hui Zhou, Yanshuang Yang, Chuanqing Zhang, Dawei Hua. Experimental investigations on loading-rate dependency of compressive and tensile mechanical behaviour of hard rocks. *Eu-*

27. Методическое руководство по ведению горных работ на рудниках ОАО «Сильвинит» / ОАО «Галургия» / Д.Н. Алыменко [и др.] – Новосибирск: Наука, 2011. – 487 с.

28. Чайковский И.И., Чиркова Е.П., Трапезников Д.Е. Хроможелезистые метаколлоидные образования из белых карналлитов Верхнекамского месторождения // Вестник ИГ Коми НЦ УрО РАН. – 2017. – No. 3. – С. 20–27.

29. Проскуряков Н.М., Пермяков Р.С., Черников А.К. Физико-механические свойства соляных пород. – Л.: Недра, 1973. – 271 с.

30. Pankov I., Asanov V., Beltyukov N. Mechanism of Scale Effect in Saliferous Rock Under Compression // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 191. – P. 918–924. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.262

31. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья / ООО «Недра-Бизнесцентр». – М., 2007. – 467 с.

32. Ломтадзе В.Д. Физико-механические свойства горных пород. Методы лабораторных исследований. – Л.: Недра, 1990. – 328 с.

33. Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения. – Пермь: Изд-во Перм. гос. тех. ун-та, 2008. – 199 с.

34. Чернышев Е.А. Литейные сплавы и их зарубежные аналоги: справочник. – М.: Машиностроение, 2006. – 336 с.

*ropean Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2015, vol. 19, no 1, pp. 70-82. DOI: 10.1080/19648189.2015.1064621.

10. Sopon Wisetsaen, Chaowarin Walsri, Kittitip Fuenkajorn. Effects of loading rate and temperature on tensile strength and deformation of rock salt. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2015, vol. 73, pp. 10-14.

11. Xueliang Xu, Shunchuan Wu, Yongtao Gao, Miaofei Xu. Effects of micro-structure and micro-parameters on brazilian tensile strength using flat-joint model. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, vol. 49, no 9, pp. 3575-3595. DOI: 10.1007/s00603-016-1021-1.

12. Abbass Tavallali, André Vervoort. Behaviour of layered sandstone under Brazilian test conditions: layer orientation and shape effects. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, vol. 5, no 5, pp. 366-377.

13. Rafiei Renani, H., Martin, C.D. The direct and Brazilian tensile strength of rock in the light of size effect and bimodularity. *48th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium 2014: Rock Mechanics Across Length and Time Scales: conference paper, USA, Minneapolis, Minnesota*, 2014, pp. 1052-1060.

14. Tolooiyan A., Mackay R., Xue J. Measurement of the Tensile Strength of Organic Soft Rock. *Geotechnical Testing Journal*, 2014, vol. 37, no. 6, pp. 991-1001. DOI: 10.1520/GTJ20140028.

15. Efimov V.P. The rock strength in different tension conditions. *Journal of Mining Science*, 2009, vol. 45, no 6, pp. 569-575. DOI: 10.1007/s10913-009-0071-0.

16. Efimov V.P. Rock tests in nonuniform fields of tensile stresses. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2013, vol. 54, no 5, pp. 857-865. DOI: 10.1134/S0021894413050192.

17. Mehdi Galouei, Ali Fakhimi. Size effect, material ductility and shape of fracture process zone in quasi-brittle materials. *Computers and Geotechnics*, 2015, vol. 65, pp. 126-135.

18. Yuichi Nakamura, Sang Ho Cho, Katsuhiko Kaneko, Shoji Kajiki, Yoshio Kiritani. Dynamic fracture experiments of

mortar using a high-speed loading apparatus driven by explosives. *Science and Technology of Energetic Materials*, 2012, vol. 41, no 5, pp. 136-141.

19. M. Cai. Practical Estimates of Tensile Strength and Hoek–Brown Strength Parameter  $m_i$  of Brittle Rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2010, vol. 43, no 2, pp. 167-184. DOI: 10.1007/s00603-009-0053-1.

20. Baryakh A.A., Konstantinova S.A., Asanov V.A. Deformirovanie solianyykh porod [Deformation of salt rocks]. *Ekaterinburg, UrB RAS*, 1996, 203 p.

21. Ali Fakhimi, Behzad Hemami. Axial splitting of rocks under uniaxial compression. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2015, vol. 79, pp. 124-134.

22. Zhigalkin, V.M., Rychkov, B.A., Usol'tseva, O.M. et al. Estimation of strength properties of rock samples in terms of calculated Mohr's envelopes. *Journal of Mining Science*, 2011, vol. 47, no 6, pp. 714-721. DOI: 10.1134/S1062739147060025.

23. Stavrogin A.N., Tarasov B.G. Eksperimental'naya fizika i mekhanika gornyykh porod [Experimental physics and rock mechanics]. *Saint Petersburg, Nauka*, 2001, 343 p.

24. Asanov V.A., Pankov I.L., Yevseyev V.S. Otsenka prochnostnykh i deformatsionnykh svoystv solianyykh porod pri rastiazhenii [Evaluation of strength and deformation properties of salt rocks under tension]. *Geology, Geophysics and development of oil and gas fields*, 2010, no 12, pp. 65-66.

25. Pankov I.L., Gushchina K.S., Bogdanova A.S. Rezul'taty kompleksnogo opredeleniia prochnostnykh i deformatsionnykh svoystv solianyykh porod pri rastiazhenii [Results of complex determination of strength and deformation properties of salt rocks under tension]. *Mining echo*, 2012, no. 3, pp. 15-18.

26. Baoyun Zhao, Dongyan Liu, Qian Dong. Experimental research on creep behaviors of sandstone under uniaxial compressive and tensile stresses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2011, vol. 3, no. 1, pp. 438-444.

27. Alymenko D.N., Alymenko N.I., Belov S.L., Zaltszeyler O.V. Metodicheskoe rukovodstvo po vedeniiu gornyykh rabot na rudnikakh OAO «Sil'vinit» / OAO «Galurgii» [Methodological guide to mining in the mines of OJSC "Silvinit" / OJSC "Galurgiya"]. *Novosibirsk, Nauka*, 2011, 487 p.

28. Tchaikovskiy I.I., Chirkova E.P., Trapeznikov D.E. Khromozhelezistye metakolloidnye obrazovaniia iz belykh karnallitov Verkhnekamskogo mestorozhdeniia [Cr-Fe meta-colloidal nodules from the white carnallite rocks of the Verkhnekamskoe salt deposit]. *Vestnik IG Komi SC UB RAS*, 2017, no 3, pp. 20-27.

29. Proskuryakov N.M., Permyakov R.S., Chernikov A.K. Fiziko-mekhanicheskie svoystva solianyykh porod [Physical and mechanical properties of salt rocks]. *Leningrad, Nedra*, 1973, 271 p.

30. Pankov I., Asanov V., Beltyukov N. Mechanism of Scale Effect in Saliferous Rock Under Compression. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 191, pp. 918-924. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.05.262.

31. Kashnikov Yu.A., Ashihmin S.G. Mekhanika gornyykh porod pri razrabotke mestorozhdenii uglevodorodnogo syr'ia [Mechanics of rocks in the development of hydrocarbon deposits]. *Moscow, OOO Nedra-Business Center*, 2007, 467 p.

32. Lomtadze V.D. Fiziko-mekhanicheskie svoystva gornyykh porod. Metody laboratornykh issledovaniy [Physical and mechanical properties of rocks. Methods of laboratory research]. *Leninograd, Nedra*, 1990, 328 p.

33. Baryakh A.A., Asanov V.A., Pankov I.L. Fiziko-mekhanicheskie svoystva solianyykh porod Verkhnekamskogo kaliinogo mestorozhdeniia [Physical and mechanical properties of salt rocks of the Verkhnekamskoye potassium deposit]. *Perm: PSTU Publishing House*, 2008, 199 p.

34. Chernyshev E.A. Liteinye splavy i ikh zarubezhnye analogi: Spravochnik [Cast alloys and their foreign counterparts: a Handbook]. *Moscow, Mashinostroenie*, 2006, 336 p.