

## РАЗРУШЕНИЕ ГОРНЫХ ПОРОД

УДК 622.02

### МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАМЕННОЙ СОЛИ И ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ОБРАЗЦОВ НА ИХ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

Али Реза Моазениан<sup>1</sup>, Фархад Абеди<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Технологический университет им. Амира Кабира, Иран

<sup>2</sup>Тегеранский университет, E-mail: Farhad\_Abedi@alumni.ut.ac.ir, Иран

Выполнена оценка механических свойств каменной соли, таких как прочность, модуль деформации, коэффициент Пуассона при одноосном сжатии. Определены значения сцепления, угла внутреннего трения, скорости распространения упругих продольных волн. Исследования выполнены на призматических образцах, полученных из соляного купола месторождения Несрабад (Иран). Сравнение деформационно-прочностных характеристик каменной соли с другими породами показало ее высокую степень деформируемости. Результаты испытаний продемонстрировали влияние формы образцов на их механические свойства. Отношение средних значений пределов прочности цилиндрических образцов к призматическим при одноосном сжатии составляет 0.83.

*Каменная соль, механические свойства, фактор влияния, ультразвуковое испытание*

DOI: 10.15372/FTPRPI20210306

Каменная соль — природный материал, относящийся к категории эвапоритов. По геологическим данным она образовалась в ходе налегания слоев друг на друга в условиях действия девиаторных напряжений и процессов деформации [1–4]. Каменная соль — осадочная горная порода с высокой способностью к деформации и с низкой проницаемостью. Эти свойства каменной соли важны для хранения горюче-смазочного материала или газа в подземных резервуарах и для консервации радиоактивных отходов [5]. Прочность на одноосное сжатие является одним из основных свойств для исследования рассматриваемых пород [6]. Другие механические свойства каменной соли, такие как сцепление, угол трения ( $C$  и  $\phi$ ), модуль деформации, более сложны для определения. В настоящее время проведено большое количество экспериментов с целью определения механических свойств цилиндрических образцов каменной соли, в результате которых выявлено ее пластическое поведение. Цилиндрические образцы каменной соли имеют включения и промежуточные слои, влияющие на механическое поведение образцов. Результаты экспериментов показали, что каменная соль обладает наименьшей прочностью и наибольшей деформируемостью среди других пород с включениями и промежуточными слоями [7–9]. Также обнаружено, что боковое давление существенно влияет на механические свойства каменной соли [5]. Скорость распространения ультразвуковых волн в цилиндрических образцах каменной соли находится в диапазоне 2.2–3.7 км/с [10–12].

Цель настоящей работы — исследование механических свойств призматических образцов каменной соли, добытой из купола месторождения Несрабад провинции Исфахам Ирана. Выполнено сравнение результатов с аналогичными характеристиками цилиндрических образцов каменной соли.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Блоки каменной соли получены из выходящего на поверхность соляного купола Несрабад (Иран). Соляное месторождение Несрабад расположено в западной части Центрально-Иранского бассейна и простирается примерно на 200 км на север в провинции Исфахан. На поверхности встречаются осадочные породы нижней красной формации, формации Кум, верхней красной формации и осадочные породы настоящей эры. В процессе выбора блоков предпочтение отдавалось чистым соляным блокам для того, чтобы включения не влияли на результат. Так как соляные блоки были чистыми, проведение анализа рентгеновской дифракции не требовалось. Следует отметить, что блоки каменной соли хранились в сухих условиях и защищались пластиковым покрытием. Подготовка образцов колонковым бурением типовыми методами оказалась невозможной, поскольку каменная соль растворяется в воде. Использовался метод сухого резания для подготовки типовых призматических образцов в соответствии с указаниями стандарта ASTM C170 [13]. После разрезания и выравнивания размеров образцы измерялись и кодировались, затем помещались в герметичные контейнеры для предотвращения влияния влажности и других условий. Высота образцов составила 12–14 см, отношение ширины к высоте образцов находилось в диапазоне 2.0–2.5.

Определение прочности на одноосное сжатие и ультразвуковые испытания проводились с целью оценки механического поведения каменной соли. Для определения прочности на одноосное сжатие использовалась установка DARTEC с сервоуправлением. Автоматическая запись данных выполнялась в заданных интервалах. Прочность и смещение измерялись датчиками, расположенными на движущемся зажиме (верхний зажим). Нагрузка прикладывалась равномерно при постоянной скорости деформации  $10^{-4}$  с. Такая нагрузка рекомендована Международным обществом механики горных пород (ISRM) [14]. В данной работе деформация ползучести не исследовалась. Нагрузка и фиксация результатов измерений осуществлялись до момента разрушения образца. Были определены пределы прочности образцов, получены зависимости “нагрузка – смещение” и “напряжение – осевая деформация” образцов.

Для повышения точности измерений и определения коэффициента Пуассона во время испытания применялись экстензометры для измерения поперечных деформаций. Осевая деформация фиксировалась датчиком в движущемся зажиме нагружающей установки, поперечная — экстензометрами. На рис. 1 представлена схема размещения датчиков на образце, а также внешний вид нагружающей установки.

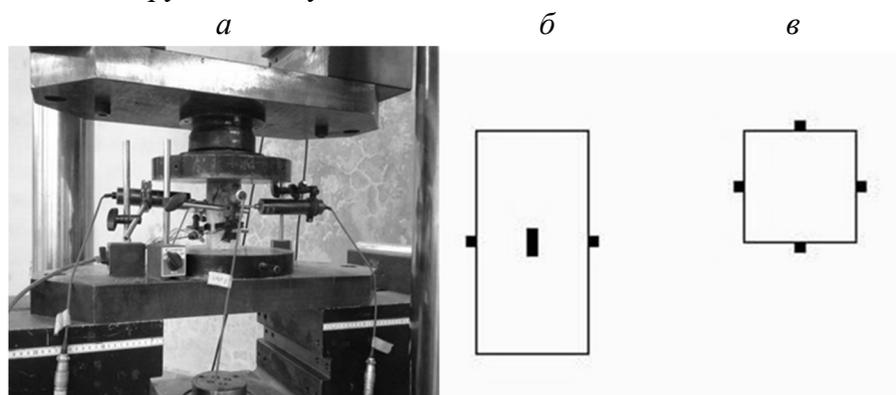


Рис. 1. Установка DARTEC с тензодатчиками для измерения поперечных деформаций (а); расположение тензодатчиков на образце — вид сбоку (б); вид сверху (в)

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования включают определение следующих механических свойств: прочность на одноосное сжатие, модуль деформации, коэффициент Пуассона, угол внутреннего трения, когезионная прочность (сцепление), скорость распространения упругих продольных волн в образцах каменной соли.

**Деформационные характеристики каменной соли.** Для наглядной демонстрации высоких пластических свойств каменной соли по сравнению с наиболее распространенными породами на рис. 2 приведены кривые “напряжение – деформация” для двух образцов каменной соли, а также кривые “напряжение – деформация” для четырех типов известняка различной прочности. Видно, что кривые известняка демонстрируют отчетливый пик и хрупкое постпиковое разрушение, тогда как явный пик на кривых каменной соли отсутствует и наблюдается постпиковый участок без существенной потери прочности. Следует отметить, что механизм разрушения каменной соли отличается от механизма разрушения наиболее распространенных пород. Возникающее в ходе нагружения распространение трещин и развитие поверхностей разлома (поверхностный сдвиг) в образцах исследуемых пород приводит к их внезапному разрушению. Согласно рис. 2, в образцах каменной соли при нагрузке нет отчетливых трещин или разломов; кристаллы соли постепенно отделяются от поверхности образца, и образец остается способным воспринимать нагрузку.

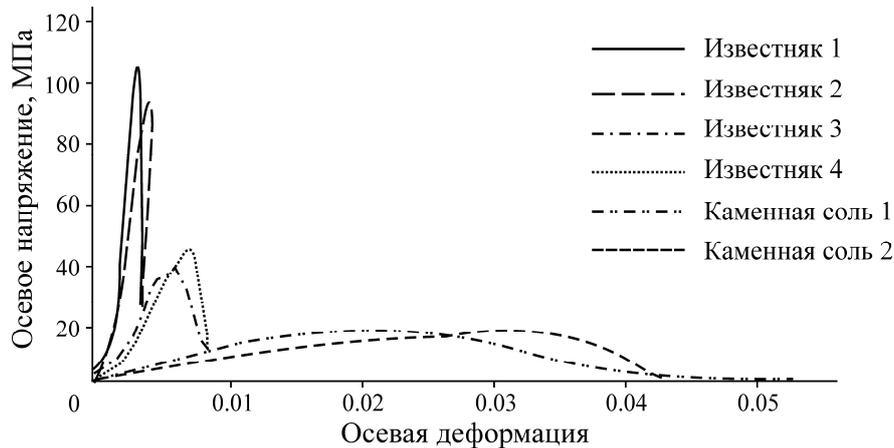


Рис. 2. Кривые “напряжение – деформация” различных пород

**Прочность на одноосное сжатие.** Прочность на одноосное сжатие рассчитана путем деления максимальной приложенной к образцу нагрузки на начальную площадь поперечного сечения. Для этой цели проведены 18 испытаний и так как некоторые образцы не соответствовали типовым размерам, выбрано 12 допустимых тестов. Данные по средней прочности на одноосное сжатие и другим свойствам образцов представлены в табл. 1.

**Модуль деформации и коэффициент Пуассона.** Модуль деформации как наклон кривой “напряжение – деформация”, вычислялся по формуле

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  — осевое напряжение сжатия, МПа;  $\varepsilon$  — осевая деформация.

В настоящей работе вследствие неупругого поведения каменной соли рассчитано среднее значение модуля деформации в интервале напряжений 25 – 75 % от пикового значения (рис. 3). Коэффициент Пуассона вычислен как отношение наклона кривой “осевая деформация – поперечная деформация” (рис. 4) в том же диапазоне использованных для модуля деформации напряжений.

ТАБЛИЦА 1. Прочность на одноосное сжатие образцов каменной соли

Образец	Высота $H$ , мм	Ширина $B$ , мм	Отношение высоты к ширине $H/B$	Площадь $A$ , мм <sup>2</sup>	Масса $W$ , кг	Пиковая нагрузка $F_{max}$ , Н	Прочность на одноосное сжатие UCS, МПа
1	150	72.5	2.07	5256	1.640	72940	13.877
2	145	72.0	2.01	5184	1.415	69780	13.478
3	149	72.5	2.06	5256	1.510	67600	12.861
4	144	72.0	2.00	5184	1.485	70870	13.671
5	128	63.0	2.03	3969	1.065	62250	15.684
6	142	66.5	2.13	4420	1.250	58110	13.147
7	138	64.0	2.16	4096	1.105	59250	14.465
8	133	64.5	2.06	4160	1.220	66160	15.904
9	135	65.0	2.08	4225	1.190	61010	14.440
10	130	64.0	2.03	4096	1.160	66280	16.182
11	152	72.0	2.11	5184	1.630	75500	14.564
12	142	63.0	2.23	3969	1.190	60870	15.336
Среднее значение							14.470

Модуль сдвига  $G$  и объемный модуль упругости  $K$  рассчитываются следующим образом:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \tag{2}$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}. \tag{3}$$

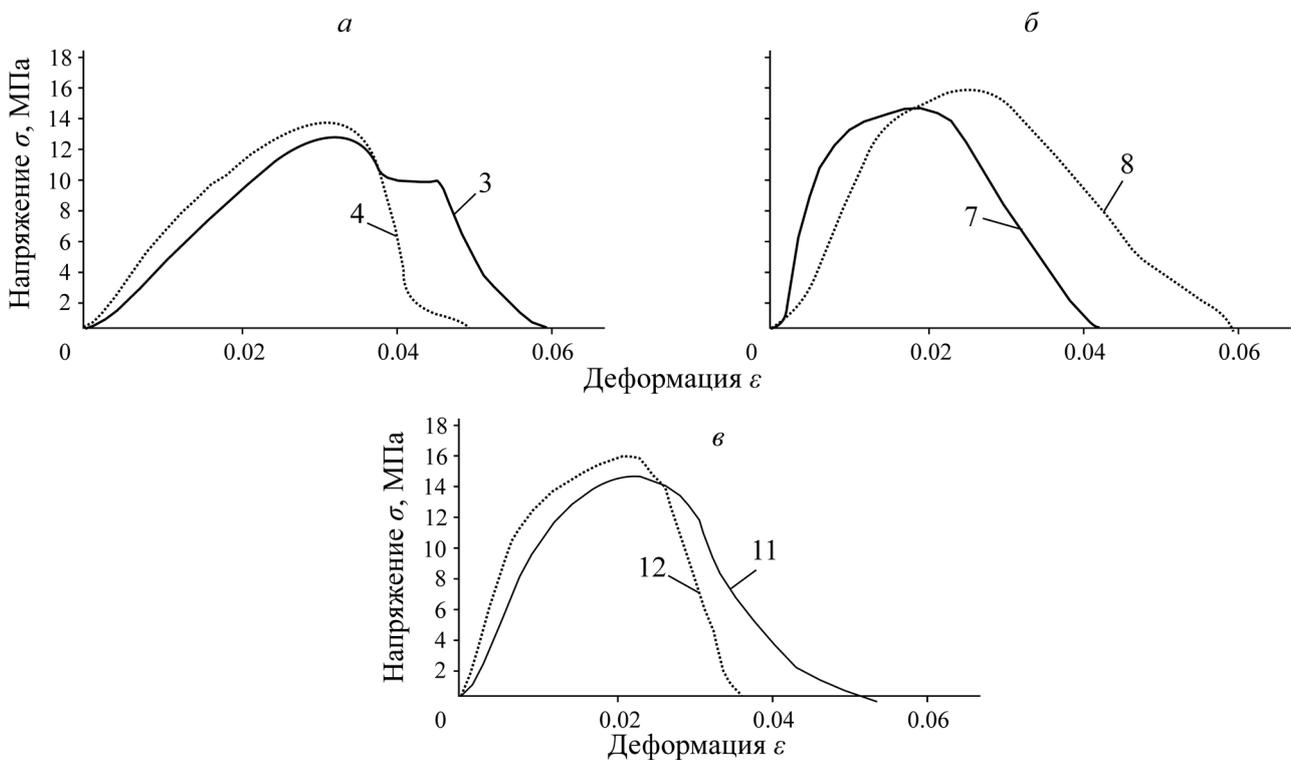


Рис. 3. Кривые “напряжение – деформация” образцов 3 и 4 (а); 7 и 8 (б); 11 и 12 (в)

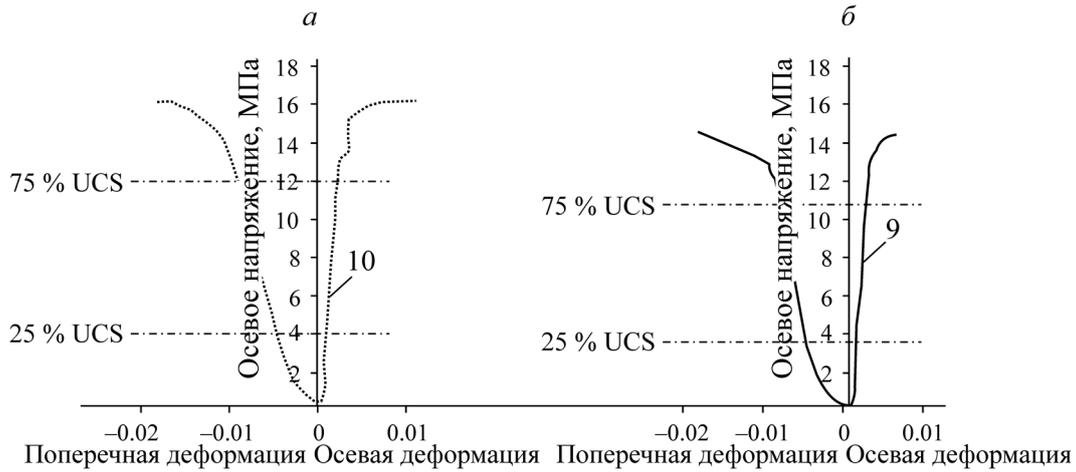


Рис. 4. Кривые “осевое напряжение — осевая деформация” (а) и “осевая деформация — поперечная деформация” (б) образцов 9 и 10

В табл. 2 представлены деформационные характеристики каменной соли.

ТАБЛИЦА 2. Определение модуля деформации образцов каменной соли. Стандарт: ASTM C170

Образец	Модуль деформации $E$ , МПа	Модуль сдвига $G$ , МПа	Объемный модуль упругости $K$ , МПа	Коэффициент Пуассона $\nu$
1	789.24	278.88	1547.53	0.276
2	765.99	270.67	1501.94	0.276
3	761.07	268.93	1492.30	0.276
4	551.27	194.80	1080.92	0.276
5	977.49	345.40	1916.64	0.270
6	1400.62	494.92	2746.32	0.270
7	1511.88	534.23	2946.48	0.270
8	1138.05	402.13	2231.47	0.270
9	1361.34	481.02	2667.29	0.270
10	1277.62	451.36	2504.63	0.279
11	1010.34	357.01	1981.06	0.279
12	1366.79	482.97	2679.96	0.279
Среднее значение	1075.98	380.19	2108.05	0.275

**Прочностные характеристики.** Используя значения пределов прочности при сжатии образцов каменной соли и применив линейный критерий Мора–Кулона, можно рассчитать параметры паспорта прочности: сцепление  $C$  и угол внутреннего трения  $\phi$ . Зная значения углов разрушения  $\theta$  образцов из уравнения  $\theta = \pi/4 + \phi/2$ , вычислены значения углов  $\phi$ . В качестве иллюстрации плоскость разрушения и угол разрушения  $\theta$  одного из образцов каменной соли показаны на рис. 5. Затем по уравнению  $C = \sigma_c(1 - \sin \phi) / 2 \cos \phi$  определены значения сцепления.

В табл. 3 приведены значения сцепления и угла внутреннего трения, рассчитанные согласно критерию разрушения Мора–Кулона.

ТАБЛИЦА 3. Определение параметров прочности

Образец	Осевая прочность $\sigma_c = \sigma_1$ , МПа	Угол трения $\phi = 2\theta - 90$ , град	Сцепление $C$ , МПа
1	13.88	21	4.77
3	12.86	38	3.13
5	15.26	38	3.72
6	13.15	35	3.42
7	14.47	24	4.70
8	15.94	21	5.48
9	14.44	38	3.52
10	16.18	22	5.46
12	15.74	22	5.30
Среднее значение	14.47	29	4.39



Рис. 5. Разрушение образца 8

**Сравнение параметров.** Для изучения влияния формы образцов на результаты определения их механических свойств, особенно на прочность при одноосном сжатии, выполнено сравнение результатов экспериментов, проведенных на призматических и цилиндрических образцах (табл. 4). Цилиндрические образцы, полученные из соляного купола месторождения Несрабад провинции Инфастан, исследованы в [15]. Высота и диаметр образцов составили 11 и 55 мм согласно стандарту ISRM [15], т. е. отношение высоты к диаметру цилиндрических образцов близко к данному соотношению для призматических образцов и составляет примерно 2. Фактор масштабирования не оказывает влияния на прочность при одноосном сжатии и им можно пренебречь, так как каменная соль является гомогенным изотропным материалом без пористости. На рис. 6 представлено значение прочности на одноосное сжатие каменной соли с различных месторождений с целью их сравнения.

ТАБЛИЦА 4. Сравнение механических свойств призматических и цилиндрических образцов

Тип образца	UCS*, МПа	$E$ , МПа	$\nu$	$C$ , МПа	$\phi$	$A$ , мм <sup>2</sup>	$F$ , кН
Призматический	14.47	1075.98	0.275	4.390	29	4583	65.885
Цилиндрический [15]	12.15	930.08	0.284	3.580	29	2332	28.350
$R = \frac{\text{Цилиндрический}}{\text{Призматический}}$	0.83	0.86	1.030	0.815	1	0.5	0.430

\*UCS — прочность на одноосное сжатие.

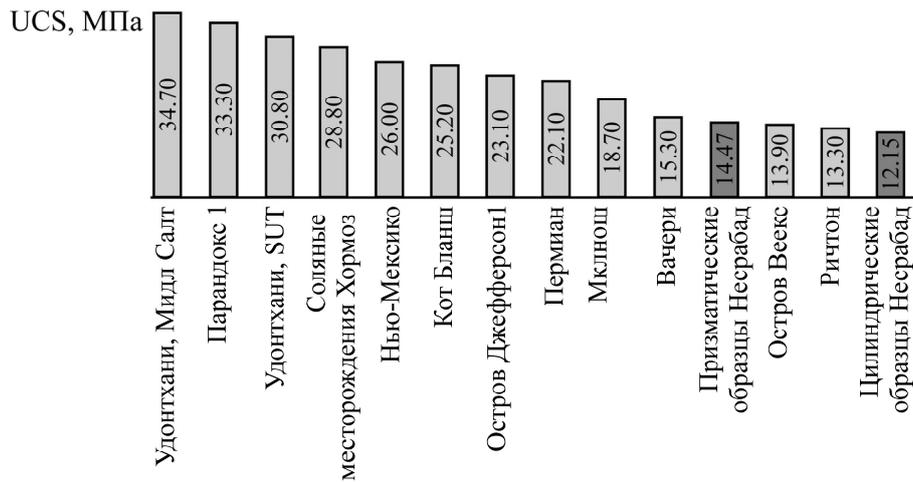


Рис. 6. Сравнение прочности на одноосное сжатие каменной соли из купола Несрабад с другими месторождениями

Концентрация напряжений в углах образцов приводит к разнице значений прочности на одноосное сжатие, определенной на цилиндрических и призматических образцах. На рис. 7 представлен критерий Мизеса для обоих типов образцов, который построен в ПО Abaqus для демонстрации концентрации напряжений. Численное моделирование выполнено на основе данных табл. 4. Видно, что в цилиндрических образцах напряжения распределены равномерно, тогда как в призматических образцах возникает концентрация напряжений в углах, что объясняет разницу между прочностью на одноосное сжатие призматических и цилиндрических образцов. Однако фактор влияния краев призматических образцов мал и им можно пренебречь. Согласно стандарту ASTM C170, полученные данные являются приемлемыми.

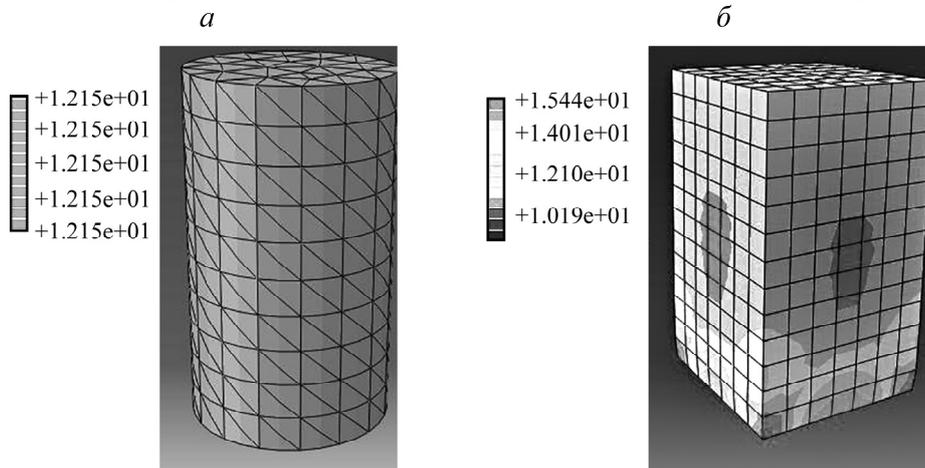


Рис. 7. Концентрация напряжений в цилиндрическом (а) и призматическом образце (б)

**Ультразвуковые испытания.** Упругие характеристики горных пород могут определяться как статическими, так и динамическими методами. При статическом методе к образцу породы прикладывается напряжение до его разрушения, после чего рассчитываются параметры упругости. Статическое испытание образца можно провести только один раз, так как в результате теста образец разрушается. Поэтому часто применяются методы неразрушающего контроля. В динамическом методе через породу пропускают ультразвуковые волны и на основе полученных данных вычисляют упругие характеристики.

Динамические тесты также могут использоваться для проверки результатов статических испытаний [5, 6]. Ниже приведены результаты экспериментов на образцах призматической формы разных размеров и с различным отношением высоты к ширине. Экспериментальные образцы вырезались из тех же блоков, что и для статических испытаний. Ультразвуковые испытания проводились в соответствии со стандартом ASTM D2845 [16]; измерялась скорость продольной волны и время прохождения волны через образец. Результаты ультразвуковых испытаний приведены в табл. 5. Видно, что скорости продольной волны в призматическом образце одинаковы и не зависят от отношения высоты к ширине.

ТАБЛИЦА 5. Результаты ультразвуковых испытаний

Образец	Высота $H$ , мм	Ширина $B$ , мм	Отношение высоты к ширине $H/B$	Площадь $A$ , мм <sup>2</sup>	Масса $W$ , кг	Скорость продольной волны $VL$ , км/с	Время прохождения волны, мс
13	120	60	2	3600	0.925	2.65	45.28
14	121	60	2.02	3600	0.930	2.70	44.81
15	60	60	1	3600	0.495	2.64	22.72
16	60	60	1	3600	0.567	2.71	22.14
17	30	60	0.5	3600	0.278	2.67	11.23
18	30	60	0.5	3600	0.290	2.65	11.32
Среднее значение	—	60	—	3600	—	2.67	—

На основании выполненных ультразвуковых испытаний и испытаний при одноосном сжатии призматических образцов каменной соли определены следующие значения механических свойств:

Прочность на одноосное сжатие, $\sigma_c$ , МПа	14.47
Модуль деформации $E$ , МПа	1075.95
Сцепление $C$ , МПа	4.25
Угол внутреннего трения $\Phi$ , град	29
Скорость продольных волн $VL$ , м/с	2670
Отношение пределов прочности цилиндрических образцов к призматическим $\sigma_c C_{y1} / \sigma_{cPi}$	0.83

## ВЫВОДЫ

Рассматриваемая каменная соль обладает высокой степенью деформируемости и способна проявлять большие деформации при одноосной нагрузке без разрушения. В результате исследований прочностных свойств соли при одноосном сжатии обнаружено, что предельная прочность каменной соли из купола Несрабад имеет более низкие значения по сравнению с каменной солью из других месторождений. На данный факт следует обратить внимание при инженерном проектировании.

Эксперименты показали, что механические свойства призматических образцов незначительно отличаются от цилиндрических образцов с аналогичными размерами. Так как колонковое бурение является трудозатратным методом, требует специального оборудования, а также вследствие того, что низкая прочность и высокие пластические свойства соли могут повлиять на ее механические свойства, для получения лабораторных образцов следует использовать метод резания. Отношение пределов прочности на одноосное сжатие цилиндрических и призматических образцов составило 0.83, что может быть учтено при расчетах.

В результате ультразвуковых испытаний получена скорость распространения продольных волн через образец соли, равная 2.67 км/с, что находится в диапазоне скоростей, характерных для других месторождений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chuanda ZI.** Observations of acoustic emission of three salt rocks under uniaxial compression, *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2015, Vol. 77. — P. 19–26.
2. **Yaser E. and Erdogan Y.** Correlation sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks, *Rock Mech. and Min. Sci. J.*, 2004, Vol. 41.— P. 871–875.
3. **Hampel A. and Schulze O.** The composite dilatancy model: A constitutive model for the mechanical behavior of salt rock. 6<sup>th</sup> Conf. on The Mechanical Behavior of Salt — SALTMECH6, Hannover, Germany, 22–25 May 2007.
4. **Nazary S., Mirzabozorg H., and Noorzad H.** Modeling time-dependent behavior of gas caverns in salt rock considering creep. *Dilatancy and failure, Tunneling and Underground Space Technol*, 2013, Vol. 33. — P. 171–185.
5. **Zhang Q., Liu J., Wang L., Luo M., Liu H., Xu H., and Zou H.** Impurity effects on the mechanical properties and permeability characteristics of salt rock, *Energies*, 2020, Vol. 13, No. 6. — P. 1366.
6. **Vutukuri V. S. and Katsuyama K.** Introduction to rock mechanics, National Institute for Resources and Environment, Japan Industrial Publication and Consulting Inc., Tokyo, 1994.
7. **Liang W., Zhang C., Gao H., Yang X., Xu S., and Zhao Y.** Experiments on mechanical properties of salt rocks under cyclic loading, *J. Rock Mech. and Geotech. Eng.*, 2012, Vol. 4, No. 1. — P. 54–61.
8. **Du C., Yang C., Yao Y., Li Z., and Chen J.** Mechanical behaviour of deep salt rock under the operational conditions of gas storage, *Int. J. Earth. Sci. Eng.*, 2012, Vol. 5, No. 6. — P. 1670–1676.
9. **Abedi F., Mousavi M., Bahroudi A., and Moazenian A.** Effect of solid impurity on creep behavior of salt rocks of Hormoz formation, *Int. J. Min. and Geo-Eng.*, 2019, Vol. 54, No. 2. — P. 161–166.
10. **Li H., Dong Z., Ouyang Z., Liu B., Yuan W., and Yin H.** Experimental investigation on the deformability, ultrasonic wave propagation, and acoustic emission of salt rock under triaxial compression, *Appl. Sci.*, 2019, Vol. 9, No. 4. — P. 635.
11. **Gorjiana M., Moosavi M., Memariane H., and Hendi S.** Temperature effect on static and dynamic properties of salt rock case study: gachsaran evaporitic formation, Iran. Paper presented at the ISRM Regional Symposium-7<sup>th</sup> Asian Rock Mechanics Symposium, 2012.
12. **Jaeger J. C., Cook N. G., and Zimmerman R.** Fundamentals of rock mechanics, John Wiley and Sons, 2009.
13. **ASTM C 170**, Standard test method for compressive strength dimension stone, Annual Book of ASTM Standard, 2016.
14. **FahimiFar Ahmad.** Rock mechanics tests; theoretical aspects and standards, soil mechanics and technical laboratory, Ministry of Road and Transportation, Tehran, 1st ed, 2014.
15. **Mumivand H., Habibi R.** An investigation into the effect of gas storage pressure variations on the stability of salt cavern, MSc Thesis, Faculty of Min. Eng., Urmia University, Iran, 2016.
16. **ASTM D 2845-15**, Standard test method for laboratory determination of pulse velocities and ultrasonic elastic constants of rock, Annual Book of ASTM Standard, 2015.

*Поступила в редакцию 28/VI 2020*

*После доработки 26/II 2021*

*Принята к публикации 24/V 2021*