

## ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКЛАДОЧНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ГАЛИТОВЫХ ОТХОДОВ

*Карасев М.А., Селихов А.А., Бычин А.К.*

*Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург*

**Ключевые слова:** закладочный массив, галитовые отходы, раздробленные соляные породы, месторождения водорастворимых руд, трехосное сжатие, дилатансия.

**Аннотация.** Использование галитовых отходов в качестве закладочного материала на месторождениях водорастворимых руд является сложившейся практикой ряда отечественных и зарубежных рудников. Однако, несмотря на повсеместное использование галитовых отходов их механический отклик при различных траекториях нагружения недостаточно изучен. Основываясь на опыте работ отечественных и зарубежных ученых была составлена программа изучения исследуемого материала. Был произведен ряд опытов объемного сжатия с использованием универсальной испытательной сервогидравлической машины MTS Model 815. В результате испытаний была получена кривая описывающая часть поверхности пластического течения в осях средних и девиаторных напряжений, также получены зависимости объемных деформаций материала от линейных. Кроме того, была составлена таблица значений угла дилатансии при различных уровнях средних напряжений. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение механического отклика галитовых отходов при неравнокомпонентном и компрессионном сжатии, а также формулировке закона упрочнения материала.

## LABORATORY STUDY OF THE BACKFILLING MATERIAL BASED ON HALITE WASTE

*Karasev M.A., Selikhov A.A., Bychin A.K.*

*Saint-Petersburg Mining University of Empress Catherine II, Saint-Petersburg*

**Keywords:** backfill, halite waste, crushed salt rocks, deposits of water-soluble ores, triaxial compression, dilatancy.

**Abstract.** The use of halite waste as a backfilling material in the deposits of water-soluble ores is the established practice of a number of domestic and foreign mines. However, despite the widespread use of halite waste, their mechanical response under various loading trajectories has not been sufficiently studied. Based on the experience of domestic and foreign scientists, a program for studying the material under study was compiled. A number of volumetric compression experiments were carried out using the MTS Model 815 universal servo-hydraulic testing machine. As a result, of the tests, a curve describing a part of the surface of the plastic flow in the axes of medium and deviator stresses was obtained, and the dependences of the volumetric deformations of the material on linear ones were also obtained. In addition, a table of values of the dilatancy angle at various levels of medium stresses was compiled. Further research will be aimed at studying the mechanical response of halite waste under unequal compression and compression tests, as well as the formulation of the law of hardening of the material.

### Введение

Месторождения водорастворимых руд, в частности калийные рудники России и мира, сталкиваются с такой аварийной ситуацией как затопление [1, 2]. Основными методами борьбы с затоплением являются оперативные технические мероприятия по увеличению несущей способности междукамерных целиков и контроль их устойчивости, мониторинг напряженно-деформированного состояния вмещающего массива, а также контроль оседаний земной поверхности [3-5]. Однако, данные мероприятия применимы на этапе строительства и эксплуатации рудников. В долгосрочной перспективе использование систем разработки с закладкой выработанного пространства является наиболее безопасным подходом для предотвращения аварийных затоплений.

Проектирование систем разработки с закладкой выработанного пространства в настоящее время основывается на прогнозе напряженно-деформированного состояния междукамерных целиков [6-8], а также прогнозе трещинообразования в водозащитной толще [9-11]. Кроме того, перспективным направлением является разработка новых составов

закладочных смесей, позволяющих снизить нагрузку на междукамерные целики еще до наступления момента посадки кровли выработки на закладочный массив [12-14].

Учет влияния закладочного массива на напряженно-деформированное состояние междукамерных целиков и водозащитной толщи невозможен без определения его физико-механических характеристик. В исследовании [15] авторы рассматривают влияние бокового давления и влажности на характер деформирования закладочного массива. В работах [16-18] исследуют термомеханические свойства раздробленных солей. В работе [19] исследуется закладочный массив Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей.

Несмотря на то, что в настоящее время разработаны отечественные [19] и зарубежные [20-22] модели, которые позволяют учитывать закладочный массив на основе раздробленных солей или галитовых отходов в расчетах, данный материал всё еще является недостаточно изученным.

Для описания механического отклика материала раздробленных соляных пород требуется проведение его комплексного исследования при различных траекториях нагружения, что в свою очередь позволит получить поверхность пластического течения и потенциала, а также выделить закон упрочнения материала по аналогии с песчаными грунтами [22-24].

### Материалы и методы исследований

В качестве испытуемого закладочного материала использовались раздробленные соляные породы или, иначе говоря, галитовые отходы. При этом гранулометрический состав представлен на рисунке 1, модуль крупности материала составил 0,88.

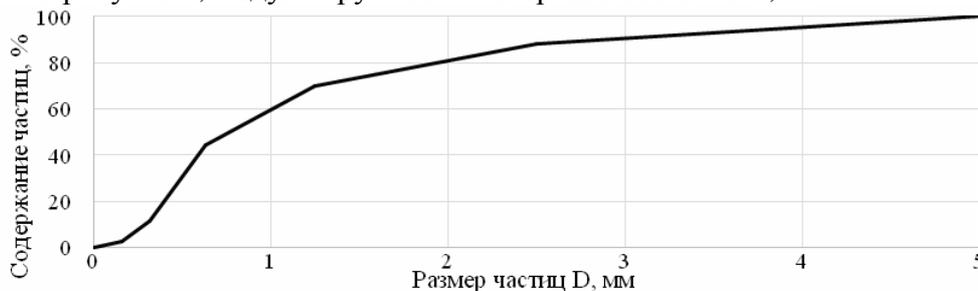


Рис. 1. Гранулометрический состав галитовых отходов

Перед проведением испытаний производилась просушка материала в течение суток при температуре 105°C. Затем в заранее подготовленную форму с размером диаметра 60 мм и высоты 130 мм засыпался материал галитовых отходов. После предварительного уплотнения до средней плотности 1400 кг/м<sup>3</sup> образец подлежал испытанию.

Проблема испытаний сыпучих материалов в камерах объемного сжатия заключается в необходимости надежной гидроизоляции образца и поддержания постоянной формы. Прорыв масла в поровое пространство сухого сыпучего материала исказит его реальный механический отклик при сложных траекториях нагружения за счет порового давления. Для решения данной проблемы была использована форма (рис. 2) из заранее обжатой на заготовке внутренней защитной оболочки 2, которая плотно фиксировалась на внутренней торцевой изолирующей пластине 4. Затем после уплотнения материала образец закрывался внешними изолирующими пластинами 5, после чего происходила повторная гидроизоляция при помощи внешней защитной оболочки 1.

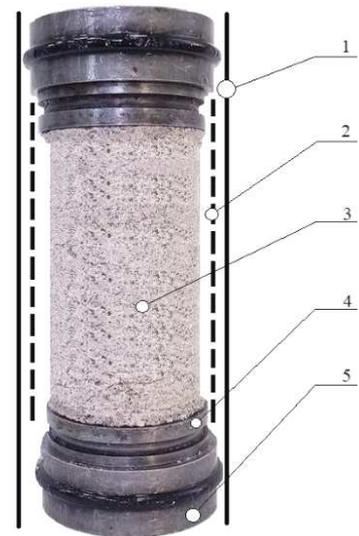


Рис. 2. Схема подготовленного образца:  
1 – внешняя оболочка образца;  
2 – внутренняя защитная оболочка образца; 3 – материал закладочного массива; 4 – внутренняя торцевая изолирующая пластина; 5 – внешняя торцевая изолирующая пластина

Основной целью испытаний являлось определение части поверхности пластического течения в координатах средних и девиаторных напряжений отвечающей за линию разрушения в модифицированной модели Друкера-Прагера [25]. При этом траектория нагружения была билинейной. Сначала образцу при нулевом уровне девиаторных напряжений задавалось требуемое гидростатическое давление, а затем происходило повышение уровня девиаторных напряжений с сохранением заданного уровня средних напряжений вплоть до разрушения образца.

Средние напряжения [25]:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3},$$

где  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$  – главные нормальные напряжения.

Девиаторные напряжения [25]:

$$q = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

В качестве оборудования использовалась универсальная сервогидравлическая испытательная машина MTS Model 815 представленная на рисунке 3.

Испытания производились согласно схеме нагружения Кармана по программе, представленной в таблице 1. Соотношение главных напряжений при схеме нагружения Кармана:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 = \sigma_3.$$



Рис. 3. Общий вид универсальной сервогидравлической испытательной машины MTS Model 815

Табл. 1. Программа испытаний согласно схеме нагружения Кармана

| № серии | Набор давления $t_1$ , мин | Выдержка давления $t_2$ , мин | Средние напряжения $p$ , МПа | Девиаторные напряжения $q$ , МПа |
|---------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 1       | 2                          | 5                             | 0,25                         | 0                                |
|         | 2                          | 5                             | 0,25                         | 0,375                            |
|         | 2                          | 5                             | 0,25                         | 0,6                              |
|         | 2                          | 5                             | 0,25                         | 0,75                             |
| 2       | 4                          | 5                             | 0,5                          | 0                                |
|         | 2                          | 5                             | 0,5                          | 0,375                            |
|         | 2                          | 5                             | 0,5                          | 0,75                             |
|         | 2                          | 5                             | 0,5                          | 1,5                              |
| 3       | 6                          | 5                             | 0,75                         | 0                                |
|         | 2                          | 5                             | 0,75                         | 0,375                            |
|         | 2                          | 5                             | 0,75                         | 1,125                            |
|         | 2                          | 5                             | 0,75                         | 2,25                             |
| 4       | 8                          | 5                             | 1,0                          | 0                                |
|         | 2                          | 5                             | 1,0                          | 0,75                             |
|         | 2                          | 5                             | 1,0                          | 1,5                              |
|         | 2                          | 5                             | 1,0                          | 3                                |
| 5       | 10                         | 10                            | 2,5                          | 0                                |
|         | 2                          | 10                            | 2,5                          | 2,25                             |
|         | 2                          | 10                            | 2,5                          | 3,75                             |
|         | 2                          | 10                            | 2,5                          | 7,5                              |

| № серии | Набор давления $t_1$ , мин | Выдержка давления $t_2$ , мин | Средние напряжения $p$ , МПа | Девиаторные напряжения $q$ , МПа |
|---------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| 6       | 15                         | 10                            | 5,0                          | 0                                |
|         | 5                          | 10                            | 5,0                          | 3,75                             |
|         | 5                          | 10                            | 5,0                          | 7,5                              |
|         | 5                          | 10                            | 5,0                          | 15,0                             |
| 7       | 20                         | 10                            | 10,0                         | 0                                |
|         | 10                         | 10                            | 10,0                         | 7,5                              |
|         | 10                         | 10                            | 10,0                         | 15,0                             |
|         | 10                         | 10                            | 10,0                         | 30,0                             |
| 8       | 30                         | 15                            | 15,0                         | 0                                |
|         | 15                         | 15                            | 15,0                         | 7,5                              |
|         | 15                         | 15                            | 15,0                         | 22,5                             |
|         | 15                         | 15                            | 15,0                         | 45,0                             |
| 9       | 30                         | 15                            | 20,0                         | 0                                |
|         | 15                         | 15                            | 20,0                         | 15,0                             |
|         | 15                         | 15                            | 20,0                         | 30,0                             |
|         | 15                         | 15                            | 20,0                         | 45,0                             |

Для понимания характера деформирования образцов закладочного массива были выполнены построения зависимостей объемных деформаций  $\epsilon_{vol}$  от продольных деформаций по направлению оси образца  $\epsilon_1$ . Кроме того, были определены углы дилатансии для закладочного материала при различных уровнях средних напряжений [26]:

$$\psi = \arcsin\left(\frac{\Delta\epsilon_v}{\Delta\epsilon_v - 2\Delta\epsilon_1}\right).$$

### Результаты

На каждую серию испытаний приходилось порядка трех образцов из галитовых отходов, затем производилось усреднение полученных кривых в осях  $p$ - $q$  и  $\epsilon_{vol}$ - $\epsilon_1$ . Результаты испытаний представлены на рисунках 4-8.

Образцы сыпучего закладочного массива на основе галитовых отходов склонны к проявлению дилатансии, углы которой были получены при максимальном значении представлены в таблице 2.

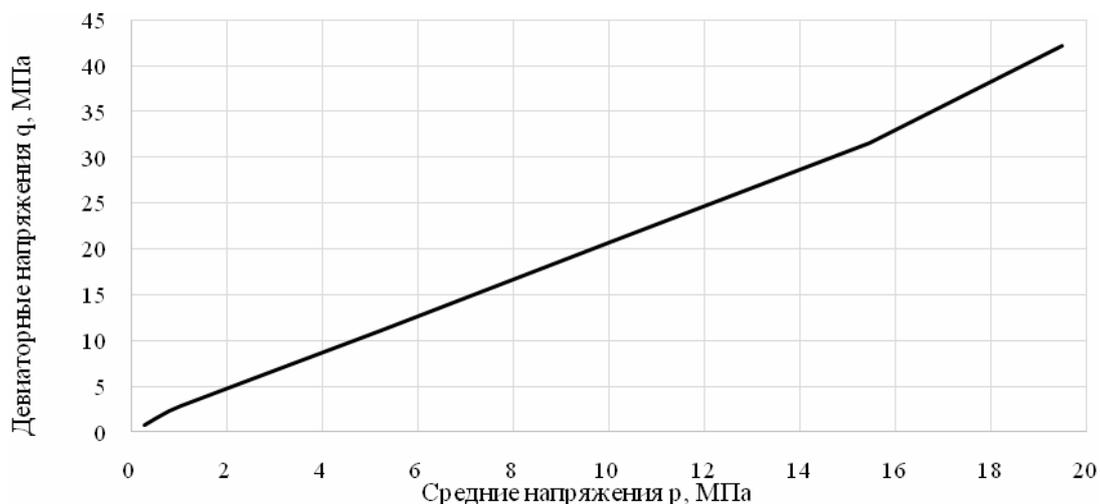


Рис. 4. График зависимости девиаторных от средних напряжений

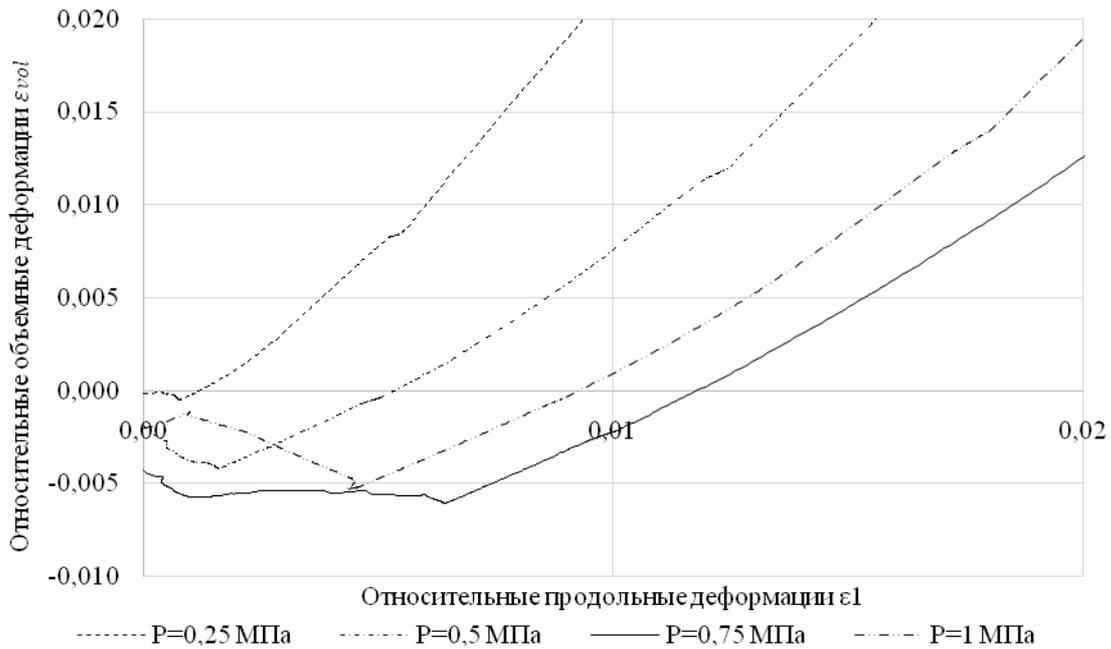


Рис. 5. Зависимость относительных объемных от относительных линейных деформаций при средних давлениях  $p$  от 0,25 до 1 МПа

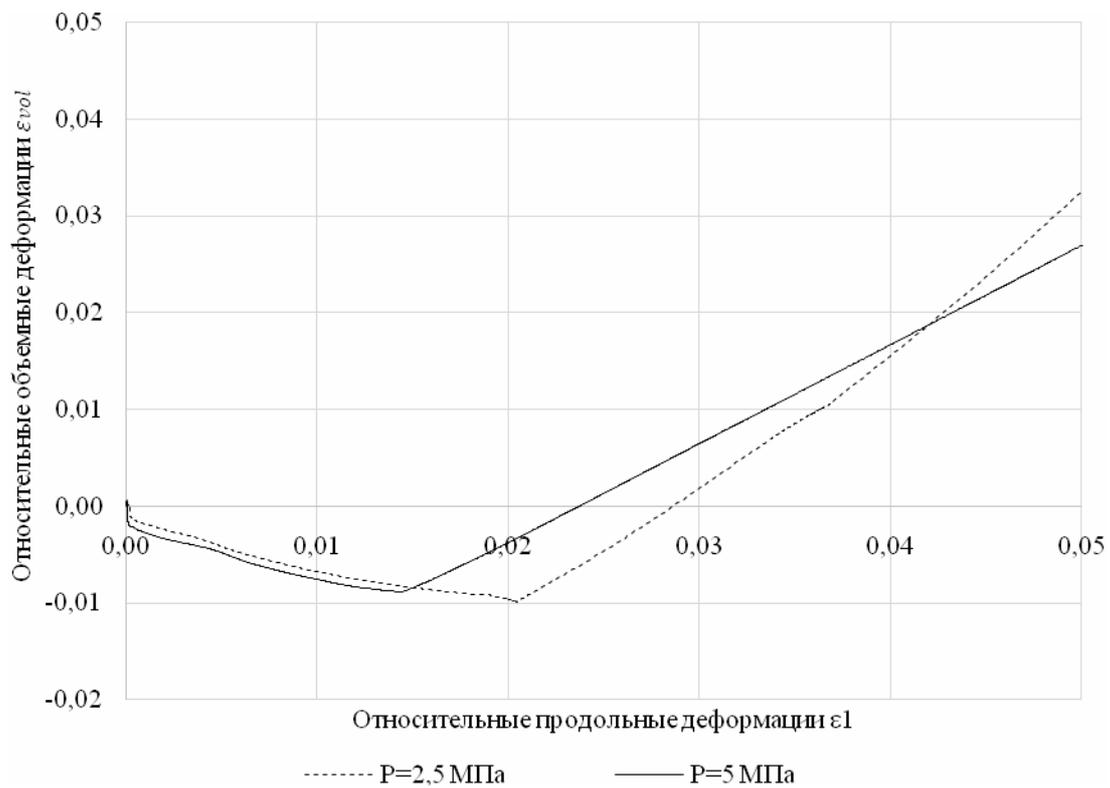


Рис. 6. Зависимость относительных объемных от относительных линейных деформаций при средних давлениях  $p$  от 2,5 до 5 МПа

Табл. 2. Углы дилатансии галитовых отходов

|                                      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Среднее напряжение $p$ , МПа         | 0,26 | 0,54 | 0,78 | 0,96 | 2,51 | 5,1   | 10,01 | 15,42 | 19,02 |
| Девiatorное напряжение $q$ , МПа     | 0,79 | 1,66 | 2,29 | 2,69 | 5,82 | 10,05 | 20,72 | 31,59 | 42,09 |
| Угол дилатансии $\psi$ , °           | 3,01 | 8,19 | 0,51 | 0,82 | 0,76 | 0,7   | 0,65  | 0,53  | 0,44  |
| Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | 1538 | 1586 | 1751 | 1633 | 1680 | 1690  | 1653  | 1778  | 1724  |

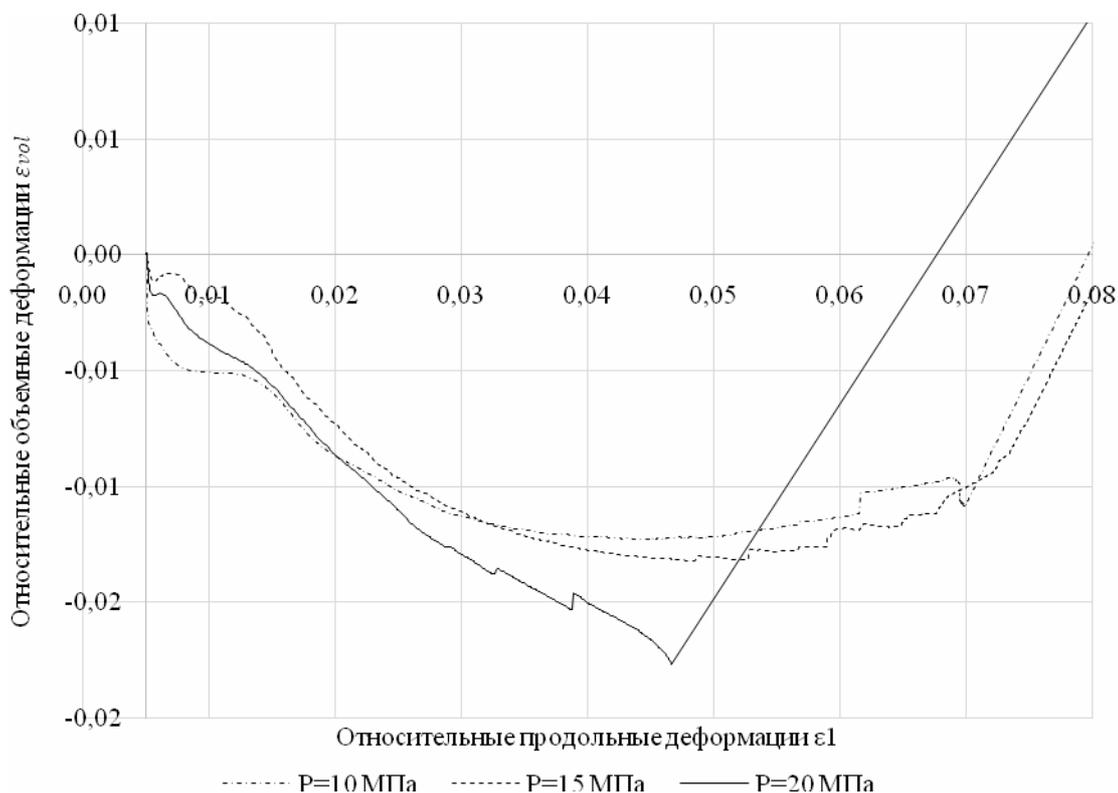


Рис. 7. Зависимость относительных объемных от относительных линейных деформаций при средних давлениях  $p$  от 10 до 20 МПа

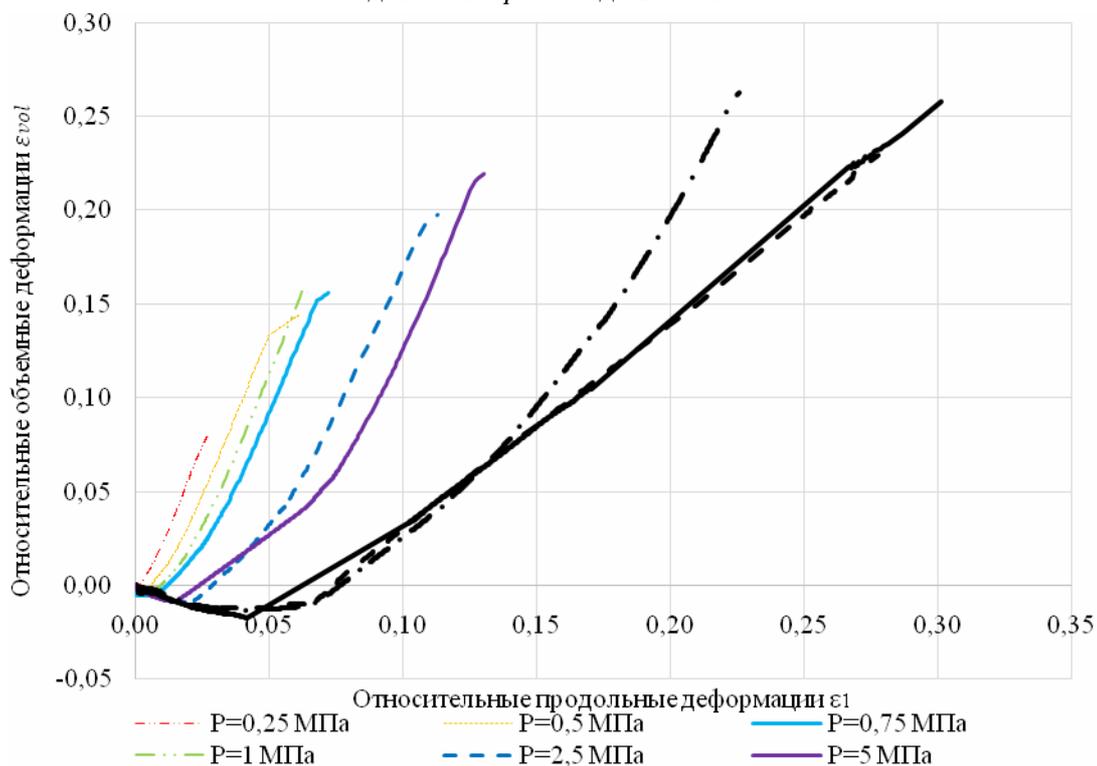


Рис. 8. Полные графики зависимостей относительных объемных от относительных продольных деформаций при уровнях средних напряжений  $p$  от 0,25 МПа до 20 МПа

### Заключение

В процессе испытаний разрушения образцов не происходило в сериях испытаний с уровнем среднего давления от 0,25 МПа до 1,0 МПа. В сериях испытаний с уровнем среднего давления от 2,5 до 20 МПа происходило разрушения образца с резким увеличением диаметра образца, в результате чего приходилось останавливать испытание. Траектория нагружения

при этом во всех испытаниях после выхода на требуемое значение среднего напряжения и повышении девиаторного напряжения вплоть до разрушения образцов оставалась практически вертикальной.

Использование двойной защитной оболочки для предотвращения проникновения масла в поровое пространство закладочного материала позволило сохранить герметичность образца на всех уровнях среднего давления.

В результате испытаний получены значения угла дилатансии при различных значениях средних и девиаторных напряжений, а также плотности.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение закладочного материала из галитовых отходов при неравнокомпонентном сжатии и компрессионных испытаниях с целью построения полной поверхности пластического течения, а также формулировки закона упрочнения.

### Список литературы

1. Барях А.А., Губанова Е.А. О мерах охраны калийных рудников от затопления // Записки Горного института. – 2019. – Т. 240, № 6. – С. 613-620. – doi.org/10.31897/PMI.2019.6.613.
2. Зубов В.П., Ковальский Е.Р., Антонов С.В., Пачгин В.В. Повышение безопасности рудников при отработке верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2019. – № 5. – С. 22-33. – doi.org/10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33.
3. Беликов А.А., Беляков Н.А. Методика прогноза напряженно-деформированного состояния междукамерных целиков, закрепленных податливой тросовой крепью // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2023. – № 4. – С. 20-34. – doi.org/10.25018/0236\_1493\_2023\_4\_0\_20.
4. Барях А.А., Асанов В.А., Санфиоров И.А. Методика контроля устойчивости соляных междукамерных целиков // Записки Горного института. – 2013. – Т. 205. – С. 134-138.
5. Беляков Н.А., Морозов К.В., Емельянов И.А. Методика обработки данных полевых испытаний по оценке естественного напряженного состояния горного массива методом кольцевой разгрузки // Горный журнал. – 2023. – №5. – С. 89-96. – doi.org/10.17580/gzh.2023.05.13.
6. Baryakh A.A., Lobanov S.Y., Lomakin I.S. Analysis of time-to-time variation of load on interchamber pillars in mines of the Upper Kama Potash Salt Deposit // Journal of Mining Science. 2015, vol. 51, pp. 696-706. doi.org/10.1134/S1062739115040064.
7. Ковальский Е.Р., Громцев К.В., Петров Д.Н. Моделирование процесса деформирования междукамерных целиков в условиях закладки очистных камер // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 9. – С. 87-101. – doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-87-101.
8. Ломакин И.С., Цаюков А.А., Евсеев А.В. Физическое и математическое моделирование процесса деформирования и разрушения междукамерных целиков // Вестник Пермского федерального исследовательского центра. – 2021. – № 1. – С. 47-53. – doi.org/10.7242/2658-705X/2021.1.4.
9. Морозов И.А., Паньков И.Л., Токсаров В.Н. Изучение устойчивости горных выработок в соляных породах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 9. – С. 36-47. – doi.org/10.25018/0236\_1493\_2021\_9\_0\_36.
10. Yan B., Tannant A., Ren F., Pei-tao W. Application of double-yield model in numerical simulation of stability of mining filling body // Arabian Journal of Geosciences. 2019, vol. 12, pp. 1-17. doi.org/10.1007/s12517-019-4679-3.
11. Lobanov S.Y., Baryakh A. On one approach to the numerical modeling of the strain-stress state of layered rock mass // Frattura ed Integrità Strutturale. 2019, vol. 13, no. 49, pp. 255-266. doi.org/10.3221/IGF-ESIS.49.25.
12. Борзаковский Б.А., Русаков М.И., Генкин М.В. Технология добычи руды с закладкой на вяжущем из хлористого кальция // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 4. – С. 284-292.
13. Шкуратский Д.Н., Русаков М.И. Использование отходов производства калийных удобрений в породных смесях для закладки выработанных пространств // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. – 2015. – № 3. – С. 87-97.
14. Конгар-Сюрюн Ч.Б., Фараджов В.В., Тюлеева Ю.С., Хайрутдинов А.М. Исследование влияния активационной обработки на галитовые отходы обогащения при приготовлении закладочной смеси // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 1. – С. 43-57. – doi.org/10.25018/0236-1493-2021-1-0-43-57.
15. Lampe B.C., Stormont J., Bauer S. Experimental investigation of the influence of pore pressure and porosity on the deformation of granular salt // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2018, vol. 110, pp. 291-305. doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.07.007.
16. Broome S.T., Bauer S., Hansen F., Mills M. Mechanical response and microprocesses of reconsolidating crushed salt at elevated temperature // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2015, vol. 48, pp. 2615-2629. doi.org/10.1007/s00603-015-0840-9.
17. Paneru L.P., Bauer S.J., Stormont J.C. Thermal properties of consolidated granular salt as a backfill material // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2018, vol. 51, pp. 911-923. doi.org/10.1007/s00603-017-1353-5.

18. Bauer S., Urquhart A. Thermal and physical properties of reconsolidated crushed rock salt as a function of porosity and temperature // *Acta Geotechnica*. 2016, vol. 11, pp. 913-924. doi.org/10.1007/s11440-015-0414-8.
19. Константинова С.А., Чернопазов С.А., Асанов В.А. Математическая модель состояния закладочного массива на Верхнекамском месторождении калийных солей // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. – 2010. – № 1. – С. 44-49.
20. Olivella S., Gens A. A constitutive model for crushed salt // *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. 2002, vol. 26, no. 7, pp. 719-746. doi.org/10.1002/nag.220.
21. Miao S., Wang M.L., Schreyer H.L. Constitutive models for healing of materials with application to compaction of crushed rock salt // *Journal of Engineering Mechanics*. 1995, vol. 121, no. 10, pp. 1122-1129. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1995)121:10(1122).
22. Sjaardema G.D., Krieg R.D. A constitutive model for the consolidation of WIPP crushed salt and its use in analyses of backfilled shaft and drift configurations. – Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 1987.
23. Li X., Ma Z., Lu W., Wang Y. True-triaxial drained test of Tengger Desert sand // *Advances in Civil Engineering*. 2020, vol. 2020, pp. 1-11. doi.org/10.1155/2020/8851165.
24. Ma Z., Li X. Aeolian Sand Test with True Triaxial Stress Path Achieved by Pseudo-Triaxial Apparatus // *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 10, pp. 8328. doi.org/10.3390/su15108328.
25. Han L.H., Ellio J., Bentham A., Millis A., Hancock B. C. A modified Drucker-Prager Cap model for die compaction simulation of pharmaceutical powders // *International Journal of Solids and Structures*. 2008, vol. 45, no. 10, pp. 3088-3106. doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.01.024.
26. Vermeer P.A. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock // *Physics of dry granular media*. – Dordrecht: Springer Netherlands, 1998. – P. 163-196. – doi.org/10.1007/978-94-017-2653-5\_10.

### References

1. Baryakh A.A., Gubanov E.A. On measures to protect potash mines from flooding // *Journal of Mining Institute*. 2019, vol. 240, no. 6, pp. 613. doi.org/10.31897/PMI.2019.6.613.
2. Zubov V.P., Kovalsky E.R., Antonov S.V., Pachgin V.V. Improving the safety of mines during mining of the Verkhnekamskoye deposit of potassium-magnesium salts // *Mining information and analytical Bulletin*. 2019, no. 5, pp. 22-33. doi.org/10.25018/0236-1493-2019-05-0-22-33.
3. Belikov A.A., Belyakov N.A. Methodology for predicting the stress-strain state of inter-chamber pillars secured with a pliable cable support // *Mining information and analytical Bulletin*. 2023, no. 4, pp. 20-34. doi.org/10.25018/0236\_1493\_2023\_4\_0\_20.
4. Baryakh A.A., Asanov V.A., Sanfirov I.A. Method of stability control of salt inter-chamber tselikov // *Journal of Mining Institute*. 2013, vol. 205, pp. 134-138.
5. Belyakov N.A., Morozov K.V., Emelyanov I.A. Methods of processing field test data to assess the natural stress state of a mountain massif by the ring unloading method // *Mining Journal*. 2023, no. 5, pp. 89-96. doi.org/10.17580/gzh.2023.05.13.
6. Baryakh A.A., Lobanov S.Y., Lomakin I.S. Analysis of time-to-time variation of load on interchamber pillars in mines of the Upper Kama Potash Salt Deposit // *Journal of Mining Science*. 2015, vol. 51, pp. 696-706. doi.org/10.1134/S1062739115040064.
7. Kovalsky E.R., Gromtsev K.V., Petrov D.N. Modeling of the deformation process of inter-chamber pillars in the conditions of laying cleaning chambers // *Mining information and analytical bulletin*. 2020, no. 9, pp. 87-101. doi.org/10.25018/0236-1493-2020-9-0-87-101.
8. Lomakin I.S., Tsayukov A.A., Evseev A.V. Physical and mathematical modeling of the process of deformation and destruction of inter-chamber pillars // *Bulletin of the Perm Federal Research Centre*. 2021, no. 1, pp. 47-53. doi.org/10.7242/2658-705X/2021.1.4.
9. Morozov I.A., Pankov I.L., Toksarov V.N. Studying the stability of mine workings in salt rocks // *Mining information and analytical Bulletin*. 2021, no. 9, pp. 36-47. doi.org/10.25018/0236\_1493\_2021\_9\_0\_36.
10. Yan B., Tannant A., Ren F., Pei-tao W. Application of double-yield model in numerical simulation of stability of mining filling body // *Arabian Journal of Geosciences*. 2019, vol. 12, pp. 1-17. doi.org/10.1007/s12517-019-4679-3.
11. Lobanov S.Y., Baryakh A. On one approach to the numerical modeling of the strain-stress state of layered rock mass // *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2019, vol. 13, no. 49, pp. 255-266. doi.org/10.3221/IGF-ESIS.49.25.
12. Borzakovsky B.A., Rusakov M.I., Genkin M.V. Technology of ore extraction with a bookmark on a binder made of calcium chloride // *Mining information and analytical bulletin*. 2014, no. 4, pp. 284-292.
13. Shkuratsky D.N., Rusakov M.I. The use of potash fertilizer production waste in rock mixtures for laying the developed spaces // *News of Tula State University. Earth Sciences*. 2015, no. 3, pp. 87-97.
14. Kongar-Suryun Ch.B., Faradzhov V.V., Tyuleeva Yu.S., Khairutdinov A.M. Investigation of the effect of activation treatment on halite enrichment waste during the preparation of the filling mixture // *Mining information and Analytical Bulletin*. 2021, no. 1, pp. 43-57. doi.org/10.25018/0236-1493-2021-1-0-43-57.
15. Lampe B.C., Stormont J., Bauer S. Experimental investigation of the influence of pore pressure and porosity on the deformation of granular salt // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2018, vol. 110, pp. 291-305. doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.07.007.

16. Broome S.T., Bauer S., Hansen F., Mills M. Mechanical response and microprocesses of reconsolidating crushed salt at elevated temperature // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015, vol. 48, pp. 2615-2629. doi.org/10.1007/s00603-015-0840-9.
17. Paneru LP., Bauer S.J., Stormont J.C. Thermal properties of consolidated granular salt as a backfill material // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2018, vol. 51, pp. 911-923. doi.org/10.1007/s00603-017-1353-5.
18. Bauer S., Urquhart A. Thermal and physical properties of reconsolidated crushed rock salt as a function of porosity and temperature // *Acta Geotechnica*. 2016, vol. 11, pp. 913-924. doi.org/10.1007/s11440-015-0414-88.
19. Konstantinova S.A., Chernopazov S.A., Asanov V.A. Mathematical model of the state of the laying array at the Verkhnekamskoye potash salt deposit // *News of higher educational institutions. Mining Journal*. 2010, no. 1, pp. 44-49.
20. Olivella S., Gens A. A constitutive model for crushed salt // *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. 2002, vol. 26, no. 7, pp. 719-746. doi.org/10.1002/nag.220.
21. Miao S., Wang M.L., Schreyer H.L. Constitutive models for healing of materials with application to compaction of crushed rock salt // *Journal of Engineering Mechanics*. 1995, vol. 121, no. 10, pp. 1122-1129. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1995)121:10(1122).
22. Sjaardema G.D., Krieg R.D. A constitutive model for the consolidation of WIPP crushed salt and its use in analyses of backfilled shaft and drift configurations. – Albuquerque, NM: Sandia National Laboratories, 1987.
23. Li X., Ma Z., Lu W., Wang Y. True-triaxial drained test of Tengger Desert sand // *Advances in Civil Engineering*. 2020, vol. 2020, pp. 1-11. doi.org/10.1155/2020/8851165.
24. Ma Z., Li X. Aeolian Sand Test with True Triaxial Stress Path Achieved by Pseudo-Triaxial Apparatus // *Sustainability*. 2023, vol. 15, no. 10, pp. 8328. doi.org/10.3390/su15108328.
25. Han L.H., Ellio J., Bentham A., Millis A., Hancock B. C. A modified Drucker-Prager Cap model for die compaction simulation of pharmaceutical powders // *International Journal of Solids and Structures*. 2008, vol. 45, no. 10, pp. 3088-3106. doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2008.01.024.
26. Vermeer P.A. Non-associated plasticity for soils, concrete and rock // *Physics of dry granular media*. – Dordrecht: Springer Netherlands, 1998. – P. 163-196. – doi.org/10.1007/978-94-017-2653-5\_10.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

|   |   |
|---|---|
| <b>Карасев Максим Анатольевич</b> – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Строительства горных предприятий и подземных сооружений  | <b>Karasev Maxim Anatolyevich</b> – doctor of technical sciences, associate professor, professor of the Department of construction of mining enterprises and underground structures   |
| <b>Селихов Александр Александрович</b> – аспирант   | <b>Selikhov Alexander Alexandrovich</b> – postgraduate student  |
| <b>Бычин Андрей Константинович</b> – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории физико-механических свойств и разрушения горных пород Научного центра геомеханики и проблем горного производства | <b>Bychin Andrey Konstantinovich</b> – candidate of technical sciences, senior researcher at the research laboratory of physical and mechanical properties and destruction of rocks of the Scientific centre of geomechanics and problems |
| Selikhov_AA@pers.spmi.ru  |   |

Получена 29.10.2023