

УДК 622.2 539.3

**ПОВЫШЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ОТВАЛОВ ПУСТОЙ ПОРОДЫ
МЕТОДОМ БИОЦЕМЕНТАЦИИ**

Шейда Парвизи¹, Рамин Дустьмохаммади², Форузан Часемин Рудсари³

Университет Зенджана,

E-mail: ¹parvizi.shayda@gmail.com, ²ramin.doostmohammadi@znu.ac.ir, ³f_ghasemian@znu.ac.ir,
6-й км дороги Табриз, г. Зенджан, Иран

Исследовано влияние биоцементации на повышение прочности дробленой горной породы на примере шахты Angouran, наиболее крупной свинцово-цинковой шахты на Ближнем Востоке. Для активации осаждения кальцита в отвале применялась бактерия *Sporosarcina pasteurii*. Показано, что прочность на одноосное сжатие, модуль деформации и скорость распространения упругих продольных волн значительно увеличились в результате биоцементации. Изучено влияние количества инъекций на прочность и скорость упругой волны нагруженной и ненагруженной породы.

*Упрочнение пустой породы, прочность на одноосное сжатие, биоцемент, микробиологически индуцированное осаждение карбоната кальция, бактерия *Sporosarcina pasteurii**

DOI: 10.15372/FTPRPI20210403

В ходе индустриализации повышается объем горнодобывающих работ, в результате которых образуются отвалы пустой породы, содержащей радионуклидные загрязнители и тяжелые металлы [1, 2]. Скапливаемые в окрестностях шахт и горно-обогатительных комбинатов опасные вещества представляют угрозу для окружающей среды и приводят к проблемам со здоровьем людей [1, 3–5].

В настоящее время низкая устойчивость отвалов — одна из главных проблем организации шахт, которая также влечет за собой экологические последствия [6, 7]. Ненарушенная горная порода характеризуется высокой прочностью, которая существенно уменьшается после ее дробления на обогатительном комбинате. Испытанная в лаборатории измельченная порода обычно обладает незначительной прочностью на сжатие, а отвалы, возводимые из такой породы, — низкой устойчивостью. Даже после установления запаса прочности на концентрацию напряжений у основания отвала имеется вероятность того, что напряжение превысит прочность измельченной породы и приведет к негативным результатам.

Существует несколько методов повышения прочности породы. Для скрепления частиц между собой наиболее широко применяют цемент и химикаты, повышающие прочность и другие механические свойства породы [8, 9]. Однако жидкий цементный раствор не может быстро и равномерно распределиться среди частиц, а синтетические химикаты дорого стоят, изменяют рН породы, повышают токсичность и негативно влияют на окружающую среду [10–13].

Необходимо использовать альтернативную технологию повышения прочности породы. Одним из эффективных методов повышения механических свойств породы является микробиологически индуцированное осаждение карбоната кальция (МИСР) [14–16]. В качестве способа повышения прочности породы биоцементация используется при решении многих геотехнических и горных задач, где требуется стабилизация породы [17, 18]. В ходе МИСР используется бактериальная уреазы для гидролиза мочевины, в результате чего в присутствии ионов кальция возникают кристаллы карбоната кальция [19, 20].

В [21] описывается биоцементация (гранулярный грунт), в ходе которой порода инъецировалась в течение 16 сут. Локальные геофизические измерения и лабораторное определение предела прочности на одноосное сжатие (UCS) показали, что прочность и модули деформации породы значительно увеличились.

Для создания образцов из песка и биоцемента в исследовании [22] использовались формы размером с красный глиняный кирпич. Образцы инъецировались в течение 7, 14 и 28 сут. Затем полученные кирпичи были испытаны на неограниченное одноосное сжатие. Максимальная прочность образцов на сжатие составила 2286.6 кПа.

Одно из важных применений МИСР — инъекция биоцементного раствора для уменьшения водопроницаемости грунта, деформированной породы и бетона с трещинами [23–25]. В [6, 26, 27] выполнено биозаполнение пор песка с помощью микробиологического осаждения. Результаты исследования показали, что проницаемость песка значительно уменьшилась.

Эрозия береговых склонов из-за приливно-отливных циклов — экологическая проблема на Ближнем Востоке. В [28] изучалась эрозия и повышение устойчивости песчаных береговых склонов с помощью микробиологического осаждения. Моделировались небольшой песчаный склон и приливно-отливные потоки в стеклянном кубе. Наблюдалось меньшее эрозионное ослабление биоцементированных склонов по сравнению с другими. Биоцементированный песок выдержал давление 470 кПа, что показывает значительную эффективность применения биоцемента для повышения устойчивости склонов [21, 28, 29].

В ходе исследований [30] илистый грунт уплотнялся методом Проктора с биоцементацией. Прочность грунта увеличилась с 152 до 275 кПа. При использовании бактерии *Sporosarcina pasteurii* доказано повышение сопротивляемости динамическим нагрузкам, которые типичны для земляных работ. Это позволяет использовать данные микроорганизмы на практике.

МИСР с низкой вязкостью может ускорить перемещение жидкости внутри малых трещин, повысить целостность ствола скважины и проводимость потока. В [31] изучалась обработка МИСР как инструмент для повышения целостности ствола скважины ниже поверхности земли. После проведенных испытаний проницаемость ствола скважины уменьшилась.

Целью настоящего исследования является повышение прочности пустой породы, прошедшей дробление и отправляемой в отвалы, с помощью биоцементации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

Образцы породы. Образцы породы, содержащей тяжелые элементы, получены из шахты Angouran, расположенной в северо-западной части Ирана. Химический состав образцов породы, взятой из разных частей отвала, представлен в табл. 1. Порода содержит опасные тяжелые металлы (кадмий, свинец, мышьяк и др.). Результат анализа распределения частиц по размеру представлен на рис. 1.

ТАБЛИЦА 1. Химический состав пустой породы из шахты Angouran

Компонент	Массовая доля, %	Компонент	Массовая доля, %	Компонент	Массовая доля, %	Компонент	Массовая доля, %
Na ₂ O	0.70200	Fe	1.12500	Zr	0.00180	Pr	< 0.00020
MgO	0.63720	Co	< 0.00030	Nb	< 0.00010	Nd	0.01030
Al ₂ O ₃	3.54600	Ni	0.0096	Mo	0.00030	Hf	0.00380
SiO ₂	12.86000	Cu	0.0044	Ag	0.00290	Ta	0.01010
P ₂ O ₅	0.14000	Zn	1.7560	Cd	0.01660	W	0.01170
SO ₃	0.22670	Ga	0.00150	Sn	< 0.00030	Hg	< 0.00010
Cl	0.03220	Ge	< 0.00005	Sb	0.00690	Tl	0.00060
K ₂ O	0.04137	As	0.04240	Te	< 0.00030	Pb	0.21110
CaO	34.87000	Se	< 0.00005	I	< 0.00030	Bi	< 0.00010
TiO ₂	0.18360	Br	0.00060	Cs	0.00130	Th	0.00090
V	0.00220	Rb	0.00110	Ba	< 0.00020	U	< 0.00010
Cr	0.00580	Sr	0.00810	La	< 0.00020	—	—
Mn	0.04420	Y	< 0.00005	Ce	< 0.00020	—	—

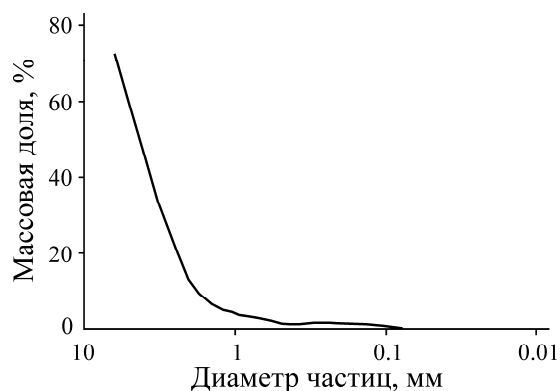


Рис. 1. Распределение частиц пустой породы по размеру

Бактериальная суспензия и условия роста. В настоящей работе для гидролиза мочевины использована *Sporosarcina pasteurii* из коллекции культур персидского типа (РТСС 1645) в качестве алкалофильной бактерии [32–37].

Культуры выращивались в бульонной питательной среде, включающей 5 г пептона и 3 г мясного экстракта на литр дистиллированной воды с присутствием 2 % мочевины [38]. Значение рН скорректировано NaOH (1N) до 9. В питательную среду производился посев бактерий, которые инкубировались аэробным образом при 30 °С и при вращении емкости со скоростью 180 об/мин в течение около 54 ч. Затем оптическая плотность раствора измерялась спектрофотометром с длиной волны 600 нм. Инкубация бактерий осуществлялась до оптической плотности около 1.0 [39].

Подготовка образцов породы. Из пустой породы подготовлены цилиндрические образцы (диаметр 57 мм, высота 170 мм), помещенные в формы из поливинилхлорида (рис. 2), обе стороны, которых закрыты крышками с отверстием 6 мм. Для удаления инъекционного раствора из формы в нижнее отверстие установлена трубка. На внутренней стороне нижней крышки расположен фильтр с диаметром 57 мм, предотвращающий вымывание частиц породы.

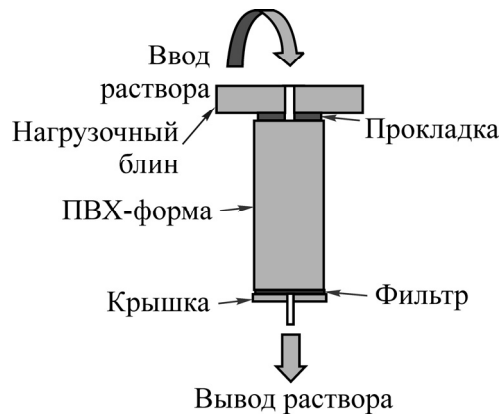


Рис. 2. Форма для инъектирования образцов породы

Инъекция биоцемента в образцы породы. Инъекция биоцемента в образцы выполнялась в двух вариантах: без нагрузки и с нагрузкой 10 кПа (рис. 3). Для каждого варианта подготовлено 12 форм, из которых, согласно табл. 2, девять форм были инъектированы раствором биоцемента, и три формы для сравнения — дистиллированной водой (контрольные формы). В обоих вариантах 12 образцов разделены на три группы, состоящие из четырех образцов. Первая, вторая и третья группа инъектировалась 20, 40 и 80 циклов соответственно.

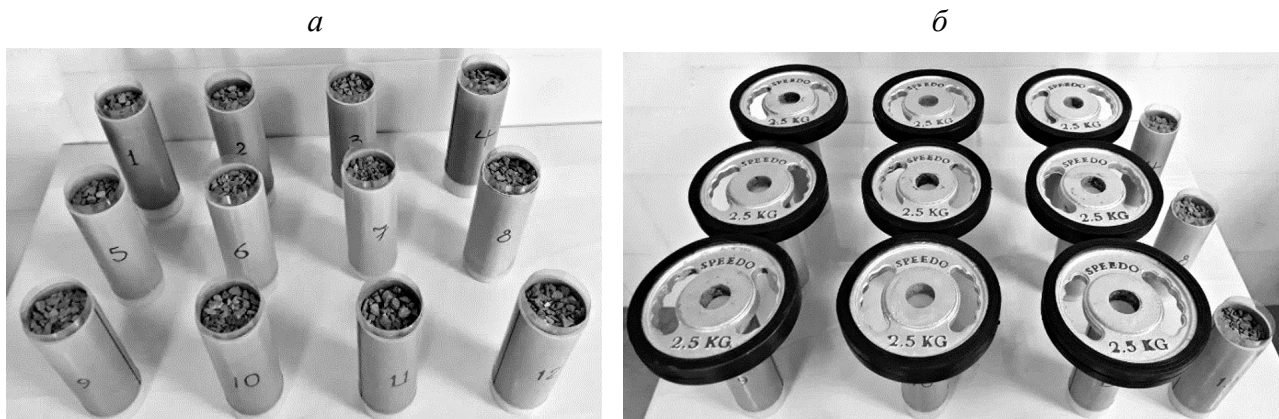


Рис. 3. Ненагруженные (а) и нагруженные (б) образцы породы

Каждый цикл состоял из одной инъекции бактериального раствора, одной инъекции хлорида кальция и одной инъекции раствора мочевины. Бактериальный раствор вводился в породу через фильтр. Насыщение породы продолжалось в течение 2 ч, затем через трубку раствор удалялся (рис. 3). После полного удаления бактериального раствора вводился раствор хлорида кальция и мочевины, насыщение которым осуществлялось в течение 15 мин.

Ввод дистиллированной воды в контрольные образцы осуществлялся таким же образом, как и в биоцементированные образцы. После последнего инъекционного цикла образцы помещены в печь на 24 ч при температуре около 60 °С для просушки. Далее образцы хранились в течение 30 дней при комнатной температуре (20 ± 2 °С) [30].

Измерение скорости распространения упругих продольных волн. Измерение скорости упругих волн — эффективный метод контроля нарастающей цементации, которая возникает в результате МІСР [10, 23]. В ходе цементации увеличивается жесткость связей между части-

цами, что приводит к сокращению пористости, увеличению прочности и повышению скорости распространения механических волн. Скорости Р-волн в образцах породы измерены и записаны с помощью установки Pundit-7 до и после цементации.

ТАБЛИЦА 2. Характеристика исследуемых образцов

Режим нагрузки	Группа	Номер	Инъекция	Количество инъекций, циклы	Масса после инъектирования, г	Длина, мм
Под нагрузкой	1	U-5	Биоцемент	20	668.9	144.7
		U-6			669.2	145.5
		U-7	Вода		645.3	143.0
		U-8			562.7	149.5
	2	U-1	Биоцемент	40	725.3	151.0
		U-2			733.8	141.0
		U-3	Вода		775.1	153.0
		U-4			580.2	148.0
	3	U-9	Биоцемент	80	771.5	152.0
		U-10			789.8	150.7
		U-11	Вода		743.1	150.0
		U-12			615.8	145.0
Без нагрузки	1	W-1	Биоцемент	20	772.0	140.2
		W-2			802.8	140.0
		W-3	Вода		885.6	144.0
		W-4			720.8	142.0
	2	W-5	Биоцемент	40	808.4	140.2
		W-6			909.7	144.0
		W-7	Вода		929.6	141.0
		W-8			740.9	143.0
	3	W-9	Биоцемент	80	899.7	146.5
		W-10			880.7	144.0
		W-11	Вода		898.9	145.5
		W-12			721.0	142.2

Измерение прочности на одноосное сжатие. Прочность породы на одноосное сжатие исследовалась на установке STM-250 с максимальной нагрузкой 25 т (рис. 4). Для обеспечения равномерного давления поверхности образцов накрывались плоской цементной крышкой (рис. 4б). Скорость нагружения составляла 0.2 мм/мин. В процессе измерения фиксировались значения пиковой и остаточной прочности, а также значения смещения и напряжения.

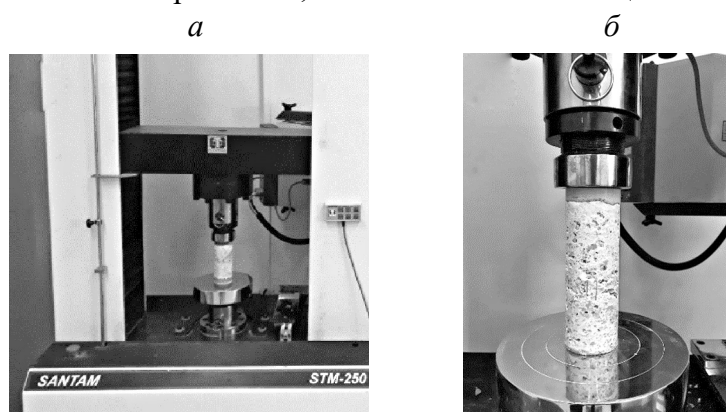


Рис. 4. Установка STM-250 для измерения UCS (а); образец под нагрузкой (б)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Осаждение карбоната кальция. До и после цементации проводилось взвешивание образцов. По формуле (1) определена примерная доля осажденного карбоната кальция на основе разницы массы образцов до и после инъекций:

$$\text{Calcium Carbonate (\%)} = \frac{w_2 - w_1}{w_2} 100, \quad (1)$$

где w_1 , w_2 — масса образца до и после инъекции соответственно.

На рис. 5 представлено осаждение карбоната кальция в зависимости от количества инъекций. При увеличении количества инъекций доля осаждения карбоната кальция растет, но интенсивность увеличения снижается, так как в ходе процесса биоцементации уменьшается пористость породы.

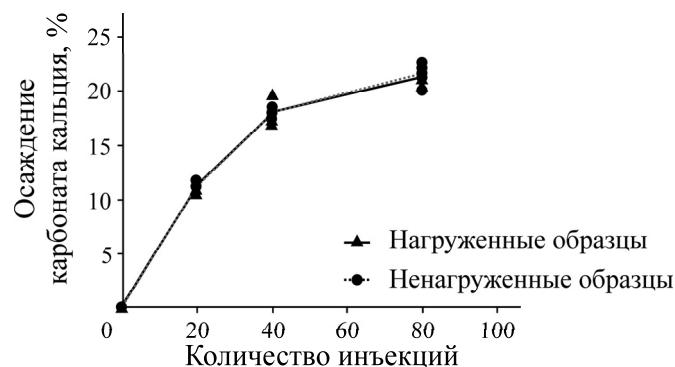


Рис. 5. Содержание карбоната кальция в зависимости от количества инъекций

Изменение скорости распространения упругих продольных волн. Скорости распространения P -волн измерялись до и после инъекций. Значения скоростей распространения P -волн в образцах для обоих вариантов биоцементации представлены на рис. 6а. При увеличении количества инъекций скорость волн в цементированных образцах превышает скорость волн в нецементированных образцах. Повышение скорости распространения волн в биоцементированных образцах объясняется увеличением доли осаждения карбоната кальция и сокращением пористости между частицами породы (рис. 6б).

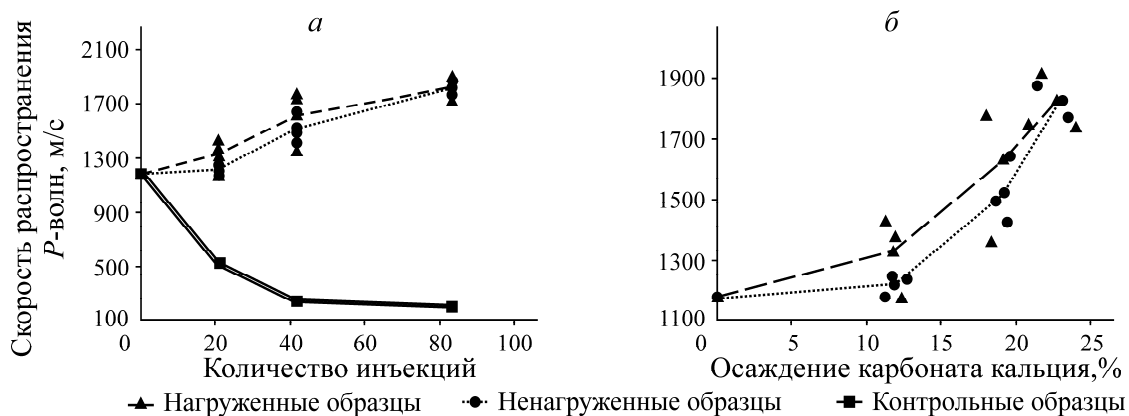


Рис. 6. Зависимость скорости распространения P -волн от количества инъекций (а) и осаждения карбоната кальция (б)

Средняя скорость волн в нагруженных образцах выше, чем в ненагруженных. Средняя скорость распространения волн в контрольных образцах уменьшилась при увеличении количества инъекций дистиллированной водой. Это объясняется недостатком связующих частиц и свободным движением частиц породы.

Изменение прочности на одноосное сжатие. В процессе нагружения образцов установкой STM-250 записаны зависимости “напряжение – деформация”. На рис. 7 представлены графики для образцов U-7 (20 инъекционных циклов), U-3 (40 инъекционных циклов) и W-9 (80 инъекционных циклов).

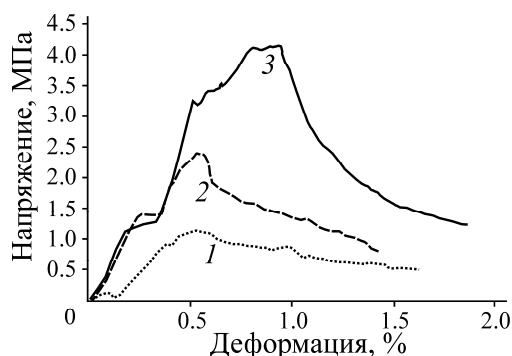


Рис. 7. Графики “напряжение – деформация” биоцементированных образцов U-7 (1), U-3 (2) и W-9 (3)

В табл. 3 представлены минимальные, средние и максимальные значения пределов прочности UCS образцов для каждой группы. Увеличение количества инъекций биоцемента повышает UCS образцов.

ТАБЛИЦА 3. Значения UCS биоцементированных образцов, МПа

Количество инъекций, циклы	Режим	Минимальное	Среднее	Максимальное
20 инъекций	Под нагрузкой	0.64	0.86	1.13
	Без нагрузки	0.39	0.59	0.95
40 инъекций	Под нагрузкой	1.62	2.01	2.43
	Без нагрузки	1.67	1.81	1.94
80 инъекций	Под нагрузкой	2.64	2.95	3.26
	Без нагрузки	2.00	2.91	4.15

Зависимость средних значений UCS нагруженных и ненагруженных образцов от количества инъекций представлена на рис. 8а. Средние значения UCS нагруженных образцов выше, чем ненагруженных. Средняя прочность UCS нагруженных и ненагруженных образцов значительно отличается при малом количестве инъекций. При увеличении количества инъекций эта разница сокращается.

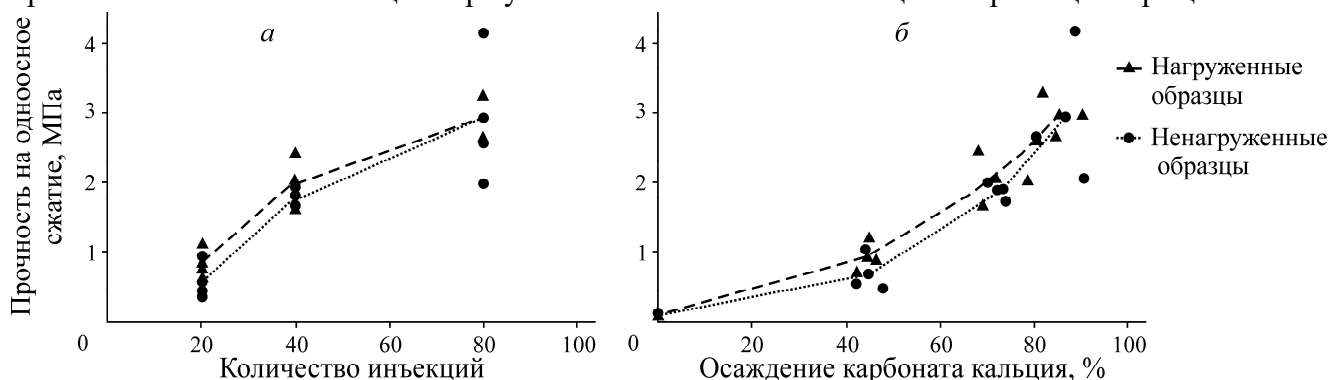


Рис. 8. Пределы прочности UCS биоцементированных образцов в зависимости от количества инъекций (а) и осаднения карбоната кальция (б)

Повышение прочности обусловлено осаждением карбоната кальция между частицами породы (рис. 8б). Нагруженное состояние обеспечивает большее количество точек контакта между частицами, поэтому нагруженные образцы обладают более высокой прочностью по сравнению с ненагруженными. Контрольные образцы, инъецированные дистиллированной водой, разрушались внутри формы (рис. 9), т. е. имели нулевую прочность на сжатие.



Рис. 9. Внешний вид разрушенных контрольных образцов

Значение отклонения прочности на сжатие нагруженных образцов относительно ненагруженных рассчитано по уравнению (2) и показано на рис. 10.

$$P = \frac{b - a}{a} 100, \quad (2)$$

где P — отклонение прочности на сжатие; a — средняя прочность UCS ненагруженных образцов; b — средняя прочность UCS нагруженных образцов.

Для 20, 40 и 80 инъекционных циклов значение отклонения P составило 44.27, 10.98 и 1.32 % соответственно. Бóльшее отклонение характерно для малого количества инъекционных циклов.

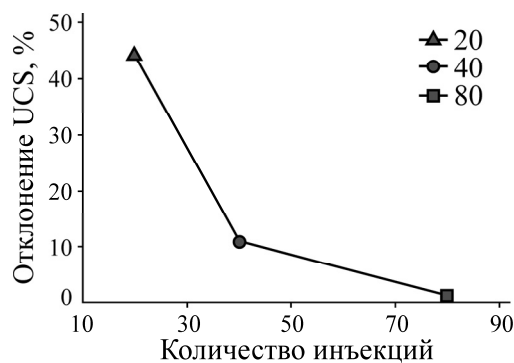


Рис. 10. Отклонение прочности UCS нагруженных образцов P относительно ненагруженных в зависимости от количества инъекций

Модуль деформации является характеристикой, необходимой для описания напряженно-деформируемого поведения породы под нагрузкой. Графики “напряжение – деформация” дают возможность определить секущий модуль деформации. Секущий модуль деформации (угол наклона кривой “напряжение – деформация” от изначального до максимального значения напряжения) рассчитан для всех групп образцов (рис. 11) [40, 41]. Результаты доказывают закономерность увеличения секущего модуля деформации в зависимости от количества инъекционных циклов.

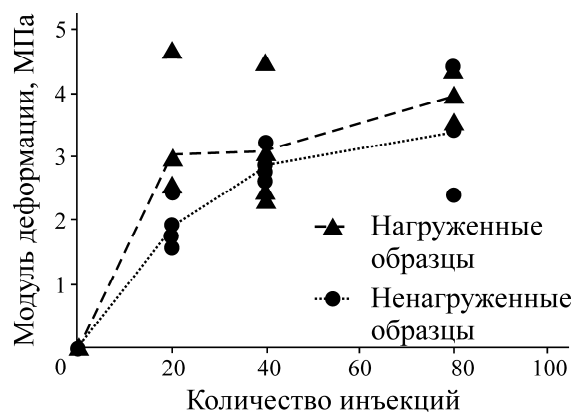


Рис. 11. Модуль деформации биоцементированных образцов в зависимости от количества инъекций

Повышение прочности UCS между 20 и 40 инъекциями P (134.53 и 204.88 %) является более существенным, чем между 40 и 80 инъекциями (46.56 и 60.85 %) в нагруженном и ненагруженном состоянии соответственно. Результаты экспериментов показали большую эффективность биоцементации на начальных этапах, когда больший объем полостей между частицами породы заполняется осаждением карбонатом кальция. Дальнейшие инъекции приводят к сокращению объема полостей, в результате чего увеличение прочности замедляется (см. рис. 8).

Отношение скорости распространения упругих продольных волн к прочности образцов на сжатие. На рис. 12 показано соотношение между прочностью на одноосное сжатие и скоростью распространения P -волн в образцах. Наблюдается линейная зависимость между данными величинами. Рост UCS приводит к увеличению скорости распространения P -волн в изучаемых образцах.

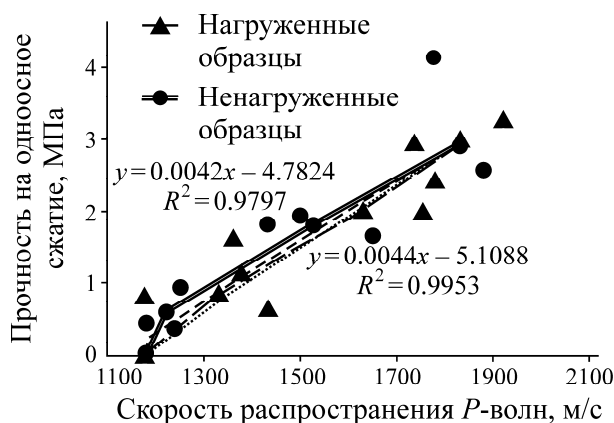


Рис. 12. Зависимость прочности UCS биоцементированных образцов от скорости распространения P -волн

ВЫВОДЫ

В результате выполненных экспериментов установлено:

- биоцементация является эффективным методом увеличения прочности пустой породы и повышения устойчивости отвалов;
- увеличение количества бактериальных инъекций повышает объем осаждения карбоната кальция, в результате чего увеличивается прочность на одноосное сжатие и скорость распространения упругих продольных волн;

- плотность образцов после 20 инъекций составила 1840 кг/м³;
- биоцементация позволила повысить прочность данной породы на одноосное сжатие от нулевой до 4.14 МПа;
- нагруженные образцы показали большие значения скорости распространения *P*-волн и прочности UCS по сравнению с ненагруженными образцами;
- предлагаемый метод является более эффективным при малом количестве инъекций. При увеличении количества инъекций рост прочности UCS замедляется;
- при увеличении прочности UCS растет скорость распространения *P*-волн. Данная зависимость является линейной для изученных образцов;

Исходя из полученных значений прочности и плотности породы, можно утверждать, что устойчивость отвалов пустой породы будет повышаться при использовании метода биоцементации. Предлагаемый метод способен сократить распространение опасных веществ в ходе горнодобывающей деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Anbu P., Kang C. H., Shin Y., and So J. S.** Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications, Springerplus, 2016, Vol. 5. — P. 250.
2. **Perez-Marin A. B., Ballester A., Gonzalez F., Blazquez M. L., Munoz J. A., Saez J., and Meseguer Zapata V.** Study of cadmium, zinc, and lead biosorption by orange wastes using the subsequent addition method, *Bioresour. Technol.*, 2008, Vol. 99. — P. 8101–8106.
3. **Guo H., Luo S., Chen L., Xiao X., Xi Q., Wei W., Zeng G., Liu C., Wan Y., Chen J., and He Y.** Bioremediation of heavy metals by growing hyperaccumulator endophytic bacterium *Bacillus* sp. L14, *Bioresour. Technol.*, 2010, Vol. 101. — P. 8599–8605.
4. **Fu F. and Wang Q.** Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review, *J. Environ. Manage.*, 2011, Vol. 92. — P. 407–418.
5. **Li M., Cheng X., and Guo H.** Heavy metal removal by biomineralization of urease producing bacteria isolated from soil, *Int. Biodeterior. Biodegrad.*, 2013, Vol. 76. — P. 81–85.
6. **Ivanov V. and Stabnikov V.** *Construction Biotechnology, Green Energy and Technology*, Springer Nature, 2017. — 317 p.
7. **Stabnikov V., Chu J., Ivanov V., and Li Y.** Halotolerant, alkaliphilic urease-producing bacteria from different climate zones and their application for biocementation of sand, *World J. Microbiol. Biotechnol.* 2013, Vol. 29. — P. 1453–1460.
8. **Khodadadi H. and Bilsel H.** Application of microorganisms for improvement of liquefiable sand, *Int. Conf. on New Developments in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Nicosia, North Cyprus, 2012.
9. **Basha E. A., Hashim R., Mahmud H. B., and Muntohar A. S.** Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement, *Constr. Build. Mater.*, 2005, Vol. 19. — P. 448–453.
10. **DeJong J., Mortensen B. M., Martinez B. C., and Nelson D. C.** Bio-mediated soil improvement, *Ecol. Eng.*, 2010, Vol. 3. — P. 197–210.
11. **Ivanov V. and Chu J.** Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ, *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, 2008, Vol. 7. — P. 139–153.
12. **Wang Z., Zhang N., Cai G., Jin Y., Ding N., and Shen D.** Review of ground improvement using microbial induced carbonate precipitation (MICP), *Marine Georesources and Geotechnology*, 2017, Vol. 35. — P. 1135–1146.

13. **DeJong J., Fritzes M., and Nusslein K.** Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2006, Vol. 32. — P. 1381–1392.
14. **Sotoudehfar A. R., Sadeghi M. M., Mokhtari E., and Shafiei F.** Assessment of the parameters influencing microbial calcite precipitation in injection experiments using taguchi methodology, *Geomicrobiol. J.*, 2016, Vol. 33, No. 2. — P. 163–172.
15. **Martinez B. C., DeJong J. T., and Ginn T. R.** Bio-geochemical reactive transport modeling of microbial induced calcite precipitation to predict the treatment of sand in one-dimensional flow, *Comput. Geotech.*, 2014, Vol. 58. — P. 1–13.
16. **Whiffin V. S., A. van Paassen L., and Harkes M. P.** Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique, *Geomicrobiol. J.*, 2007, Vol. 24. — P. 417–423.
17. **Lian J., Xu H., He X., Yan Y., Fu D., Yan S., and Qi H.** Biogrouting of hydraulic fill fine sands for reclamation projects, *Marine Georesources and Geotechnology*, 2018, Vol. 37. — P. 1–11.
18. **Seifan M., Khajeh Samani A., and Berenjian A.** Bioconcrete: next generation of self-healing concrete, *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2016, Vol. 100. — P. 2591–2602.
19. **De Muynck W., De Belie N., and Verstraete W.** Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review, *Ecol. Eng.*, 2010, Vol. 36. — P. 118–136.
20. **Al-Salloum Y., Hadi S., Abbas H., Almusallam T., and Moslem M. A.** Bio-induction and bioremediation of cementitious composites using microbial mineral precipitation – A review, *Construction and Building Materials*, 2017, Vol. 154. — P. 857–876.
21. **Paassen L., Ghose R., Linden T., Star W., and Loosdrecht M.** Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: large-scale biogrout experiment, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2010, Vol. 136. — P. 1721–1728.
22. **Bernardi D., DeJong J. T., Montoya B. M., and Martinez B. C.** Bio-bricks: biologically cemented sandstone bricks, *Construction and Building Materials*, 2014, Vol. 55. — P. 462–469.
23. **Stabnikov V., Ivanov V., and Chu J.** Construction Biotechnology: a new area of biotechnological research and applications, *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 2015, Vol. 31. — P. 1303–1314.
24. **Chu J., Ivanov V., Naeimi M., Stabnikov V., and Liu H.-L.** Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand, *Acta Geotech.*, 2014, Vol. 9. — P. 277–285.
25. **Cuthbert M. O., McMillan L. A., Handley-Sidhu S., Riley M. S., Tobler D. J., and Phoenix V. R.** A field and modeling study of fractured rock permeability reduction using microbially induced calcite precipitation, *Environ. Sci. Technol.*, 2013, Vol. 47. — P. 13637–13643.
26. **Ivanov V., Chu J., and Stabnikov V.** Basics of construction microbial biotechnology, *Biotechnologies Biomimetics Civil Engineering*, Springer, 2015. — P. 21–5.
27. **Yang Y., Chu J., Xiao Y., Liu H., and Cheng L.** Seepage control in sand using bioslurry, *Construction and Building Materials*, 2019, Vol. 212. — P. 342–349.
28. **Salifu E., MacLachlan E., Iyer K. R., Knapp W. C., and Tarantino A.** Application of microbially induced calcite precipitation in erosion mitigation and stabilisation of sandy soil foreshore slopes: A preliminary investigation, *Eng. Geology*, 2016, Vol. 201. — P. 96–105.
29. **DeJong J. T., Soga K., Kavazanjian E., Burns S., Van Paassen L. A., Al Qabany A., et al.** Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges, *Geotechnique*, 2013, Vol. 63. — P. 287–301.
30. **Grabiec A. M., Starzyk J., Stefaniak K., Wierzbicki J., and Zawal D.** On possibility of improvement of compacted silty soils using biodeposition method, *Construction and Building Materials*, 2017, Vol. 138. — P. 134–140.

31. **Phillips A., Troyer E., Hiebert R., Kirkland C., Gerlach R., Cunningham A. B., Spangler L., Kirksey J., Rowe W., and Esposito R.** Enhancing wellbore cement integrity with microbially induced calcite precipitation (MICP): A field scale demonstration, *J. Pet. Sci. Eng.*, 2018, Vol. 171. — P. 1141–1148.
32. **Mitchell C. A. and Ferris F. G.** Effect of strontium contaminants upon the size and solubility of calcite crystals precipitated by the bacterial hydrolysis of urea, *Environ. Sci. Technol.*, 2006, Vol. 40. — P. 1008–1014.
33. **Achal V., Mukherjee A., Basu P. C., and Reddy M. S.** Strain improvement of *Sporosarcina pasteurii* for enhanced urease and calcite production, *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, 2009, Vol. 36. — P. 981–988.
34. **Tobler D. J., Cuthbert M. O., Greswell R. B., Riley M. S., Renshaw J. C., Handley-Sidhu S., and Phoenix V.** Comparison of rates of ureolysis between *Sporosarcina pasteurii* and an indigenous groundwater community under conditions required to precipitate large volumes of calcite, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2011, Vol. 75. — P. 3290–3301.
35. **Cuthbert M. O., Riley M. S., Handley-Sidhu S., Renshaw J. C., Tobler D. J., Phoenix V., and Mackay R.** Controls on the rate of ureolysis and the morphology of carbonate precipitated by *S. Pasteurii* biofilms and limits due to bacterial encapsulation, *Ecol. Eng.*, 2012, Vol. 41. — P. 32–40.
36. **Al Qabany A. A., Soga K., and Santamarina C.** Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 2012, Vol. 138. — P. 992–1001.
37. **Gorospe C. M., Han S. H., Kim S. G., Park J. Y., Kang C. H., Jeong J. H., and So J. S.** Effects of different calcium salts on calcium carbonate crystal formation by *Sporosarcina pasteurii* KCTC 3558, *Biotechnol. Bioproc. Eng.*, 2013, Vol. 18. — P. 903–908.
38. **Sharma A. and Ramkrishnan R.** Study on effect of Microbial Induced Calcite Precipitates on strength of fine grained soils, *Perspectives Sci.*, 2016, Vol. 8. — P. 198–202.
39. **Cardoso R., Pires I., Duarte S., and Monteiro G.** Effects of clay's chemical interactions on biocementation, *Applied Clay Sci.*, 2018, Vol. 156. — P. 96–103.
40. **Malkowski P. and Ostrowski L.** The Methodology for the young modulus derivation for rocks and its value, *Symposium of the International Society for Rock Mechanics, Procedia Eng.*, 2017, Vol. 191. — P. 134–141.
41. **Santi P., Holschen J., and Stephenson R.** Improving elastic modulus measurements for rock based on geology, *Environmental Eng. Geoscience*, 2000, Vol. 6. — P. 333–346.

Поступила в редакцию 14/II 2021

После доработки 15/VI 2021

Принята к публикации 30/VI 2021