

ПРОЧНОСТЬ НА СЖАТИЕ СВЯЗНОГО ГРУНТА, УКРЕПЛЕННОГО С ПОМОЩЬЮ ЦЕМЕНТАЦИИ МИКРОБИОЛОГИ- ЧЕСКИМ МЕТОДОМ



АЛЬКАДРИ

Факультет гражданского строительства
Университета Хасануддина,
г. Макаassar, округ Гоа, провинция
Южный Сулавеси, Индонезия
alkadri19d@student.unhas.ac.id

ДЖАМАЛУДДИН А.Р.

Факультет гражданского строительства
Университета Хасануддина,
г. Макаassar, округ Гоа, провинция
Южный Сулавеси, Индонезия

ХАРИАНТО Т.

Факультет гражданского строительства
Университета Хасануддина,
г. Макаassar, округ Гоа, провинция
Южный Сулавеси, Индонезия

АРСЯД А.

Факультет гражданского строительства
Университета Хасануддина,
г. Макаassar, округ Гоа, провинция
Южный Сулавеси, Индонезия

АННОТАЦИЯ

Представляем сокращенный адаптированный перевод доклада индонезийских изыскателей «Прочность на сжатие связного грунта, укрепленного с помощью цементации микробиологическим методом» (Alkadri et al., 2022). Этот доклад был сделан в 2022 году в Индонезии на 4-й Международной конференции по гражданскому строительству и инженерной защите окружающей среды. Он также был опубликован в виде статьи в журнале *Earth and Environmental Science* («Науки о Земле и окружающей среде») издательством британской благотворительной научной организации IOP (Institute of Physics – «Институт физики»), фактически ставшей международной. Эта статья находится в открытом доступе по лицензии CC BY 3.0, которая позволяет распространять, переводить, адаптировать и дополнять ее при условии указания типов изменений и ссылки на первоисточник. В нашем случае полная ссылка на источник для представленного перевода (Alkadri et al., 2022) приведена в конце.

Следует подчеркнуть, что материалы по биоцементации грунтов могут быть интересны российским читателям, поскольку эти методы не являются распространенными в нашей стране и по ним очень мало отечественных публикаций. Но вполне возможно, что по мере развития биотехнологий в промышленных масштабах методы микробиологического усиления грунтов распространятся и у нас.

Цель исследования индонезийских авторов – оценка физико-механических характеристик супеси, укрепленной с помощью цементации микробиологическим методом. Для биоцементации использовалась культура бактерий *Bacillus subtilis* возрастом 2, 4 и 6 дней с момента посева в жидкую питательную среду. Растворы бактериальной культуры добавляли к пробам грунта с оптимальной влажностью в количествах 4, 6 и 8% от массы пробы. Затем пробы перемешивали и формовали. Время выдержки этих образцов составляло 3, 7, 14 и 28 дней. Затем их испытывали на одноосное сжатие.

Максимальную прочность при сжатии продемонстрировал образец грунта, к которому был добавлен 4-дневный раствор бактериальной культуры в количестве 6% по массе при выдержке 28 дней. Предел его прочности на сжатие увеличился в 6 раз по сравнению с исходным грунтом, не подвергавшимся биоцементации. Авторы считают, что укрепленные биоцементацией грунты можно использовать в дорожном строительстве – для усиления основания, земляного полотна и насыпи. Но для этого, как они указывают, еще предстоит полномасштабные полевые испытания.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

грунт; супесь; бактериальная культура *Bacillus subtilis*; биоцементация; карбонатная биоминерализация; испытание на одноосное сжатие; прочность на сжатие.

ССЫЛКА ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Алькадри, Джамалуддин А.Р., Харианто Т., Арсяд А. Прочность на сжатие связного грунта, укрепленного с помощью цементации микробиологическим методом (пер. с англ.) // *Геоинфо*. 2023. Vol. 5. № 9/10. С. 42–47 DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-9/10-42-47

THE COMPRESSIVE STRENGTH OF COHESIVE SOIL STABILIZED WITH MICROBIAL INDUCED CEMENTATION

ALKADRI

Departement of Civil Engineering,
Hasanuddin University, Makassar city,
Gowa region, South Sulawesi province,
Indonesia
alkadri19d@student.unhas.ac.id

DJAMALUDDIN A.R.

Departement of Civil Engineering,
Hasanuddin University, Makassar city,
Gowa region, South Sulawesi province,
Indonesia

HARIANTO T.

Departement of Civil Engineering,
Hasanuddin University Makassar city,
Gowa region, South Sulawesi province,
Indonesia

ARSYAD A.

Departement of Civil Engineering,
Hasanuddin University, Makassar city,
Gowa region, South Sulawesi province,
Indonesia

ABSTRACT

We present an abridged and adapted translation of the report "The compressive strength of cohesive soil stabilized with microbial induced cementation" by Indonesian site investigators (Alkadri et al., 2022). This report was made at the 4th International Conference on Civil and Environmental Engineering in 2022 in Indonesia (ICCEE 2022). It was also published as an article in the journal "Earth and Environmental Science" by the publishing company of the British scientific society "Institute of Physics" (IOP) that is now virtually international. It is an open access article under the CC BY 3.0 license that allows it to be distributed, translated, adapted, and supplemented, provided that the types of changes are noted and the original source is referred to. In our case, the full reference to the original paper (Alkadri et al., 2022) for the presented translation is given in the end.

It should be emphasized that materials on soil biocementation methods may be of interest to Russian readers, because these methods are not common in our country, and there are very few domestic publications on them. But it is quite possible that as biotechnologies develop on an industrial scale more, methods of microbiological stabilization of soils will spread in our country, too.

The purpose of the study by the Indonesian authors is to evaluate the physical and mechanical characteristics of sandy loam strengthened by cementation using the microbiological method. For the biocementation, they used a bacterial culture of *Bacillus subtilis* aged 2, 4, and 6 days from the sowing in a liquid nutrient medium. The bacterial culture solutions were added to the soil samples (with optimal humidity) in quantities of 4, 6 and 8% of the sample weight. Then the samples mixed and formed. The exposure times for these samples were 3, 7, 14, and 28 days. Then they were undergone to unconfined compressive tests. The maximal compressive strength was demonstrated by the soil sample that had been treated with the 4-day bacterial culture solution in an amount of 6% by weight and had been cured for 28 days. Its compressive strength was 6 times more than the compressive strength of the original soil that was not subjected to biocementation. The authors consider that soils after biocementation can be used in road construction in order to stabilize the base, subgrade, and embankment. But for this, as they point out, full-scale field tests are still ahead.

KEYWORDS:

soil; sandy loam; *Bacillus subtilis* bacterial culture; biocementation; carbonate biomineralization; unconfined compressive test; compressive strength.

FOR CITATION:

Alkadri, Djameluddin A.R., Harianto T., Arsyad A. Prochnost' na szhatiye svyaznogo grunta, ukreplennogo s pomoshch'yu tsementatsii mikrobiologicheskim metodom [The compressive strength of cohesive soil stabilized with microbial induced cementation] (translated from English into Russian) // Geoinfo. 2023. Vol. 5. № 9/10. С. 42–47 DOI:10.58339/2949-0677-2023-5-9/10-42-47 (in Rus.).

ВВЕДЕНИЕ ►

Грунт вдоль трассы будущего строительства автомагистрали имеет разные характеристики. Поэтому несущая способность грунтового основания неодинакова вдоль трассы. При этом не все типы грунтов в принципе могут быть использованы в качестве основания, земляного полотна и насыпи при строительстве дорог (или других сооружений). При пла-

нировании и проведении таких работ необходимо принимать во внимание свойства и поведение грунта. И здесь очень важным стал учет возможности улучшения свойств грунтов, поскольку из-за увеличения темпов роста численности населения и соответствующего строительства разных объектов становится все труднее находить подходящие грунтовые основания и грунты для создания зем-

ляного полотна и насыпи при дорожном строительстве.

Когда замена материалов или использование химикатов для усиления грунтового основания, земляного полотна или насыпи неэффективны, необходимо использовать другие методы улучшения качества имеющегося грунта без необходимости его замены и без нанесения ущерба окружающей среде.

Необходимо продолжать попытки использования биологических процессов для изменения свойств грунта – бактерий, способных вызывать биоцементацию (карбонатную биоминерализацию) благодаря выделению такого продукта метаболизма, как карбонат кальция (CaCO_3), который откладывается в порах грунта в виде кальцита [1]. Использование микроорганизмов рассматривается как альтернатива в условиях распространенного применения химических веществ и синтетических материалов в гражданском строительстве [2]. Эффективное образование CaCO_3 повысит прочность и жесткость слоев земляного полотна и насыпи при сохранении характеристик проницаемости грунта [3].

Карбонатная биоминерализация возможна благодаря способности некоторых бактерий, которые в естественных условиях живут в почвах, вырабатывать фермент уреазу и выделять карбонат кальция. Благодаря этому, например, материал, оставшийся в отвалах после добычи полезных ископаемых, после цементации микробиологическим методом с использованием культуры бактерий *Bacillus subtilis* (сенной палочки) может быть использован в том числе в дорожном строительстве [4].

При исследовании [5] добавление культуры этих бактерий для укрепления супеси методом биоцементации позволило увеличить несущую способность данного грунта.

В работе [6] прочность на одноосное сжатие песка, смешанного с тропической почвой с большим количеством органики (и с живущими там бактериями, способными вызывать биоцементацию), после выдержки в течение 3 дней также увеличилась.

В соответствии с критериями диапазона значений калифорнийского коэффициента несущей способности (CBR) $20\% \leq \text{CBR} < 40\%$, применяемого в дорожном строительстве, добавление от 3,5 до 6% раствора бактериальной культуры *Bacillus subtilis* от массы грунта с оптимальной влажностью для укрепления подстилающего слоя глинистого грунта оказалось технически оправданным – получился материал с коэффициентом постели от 68 до 110 $\text{kH}/\text{m}^2/\text{mm}$ [7]. Эти результаты показали важную роль использования бактерий *Bacillus subtilis* в качестве биотехнологического стабилизирующего материала для повышения несущей способности и коэффициента постели такого грунта, как высокопластичная глина [7].

В работе [8] изучалась трансформация структуры песчаного грунта после биоцементации с выдержкой 14 дней при варьировании применявшихся бактерий.

В исследовании, представленном в настоящей статье, в отличие от предыдущих работ использовали разное количество вводимой в грунт бактериальной культуры (4, 6, 8% от массы грунта с оптимальной влажностью), разный возраст этой культуры с момента посева в жидкую питательную среду (2, 4, 6 суток) и разное время выдержки смеси грунта с бактериями (3, 7, 14, 28 суток) в поисках оптимальных условий для получения наилучшей прочности на одноосное сжатие.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ►

Приготовление материала ►

Материал, использованный при исследовании, был взят на территории города Макаassar (провинция Южный Сулавеси, Индонезия). Отбор проб (рис. 1) производился с помощью мотыги и лопаты. Затем образцы помещались в специальные пакеты, заворачивались в пластик для сохранения исходной влажности и маркировались в соответствии с местом отбора.

Вторым этапом было проведение лабораторных исследований отобранного грунта: определение его влажности, плотности, пределов Аттерберга (предела пластичности и предела текучести), гранулометрического состава, проведение стандартного испытания на



Рис. 1. Образец грунта



Рис. 2. Раствор культуры бактерий *Bacillus subtilis*

уплотнение по Проктору для определения оптимальной влажности, испытание на одноосное сжатие.

В этом исследовании использовался раствор культуры бактерий *Bacillus subtilis* (рис. 2). Причина выбора именно этих микроорганизмов заключалась в

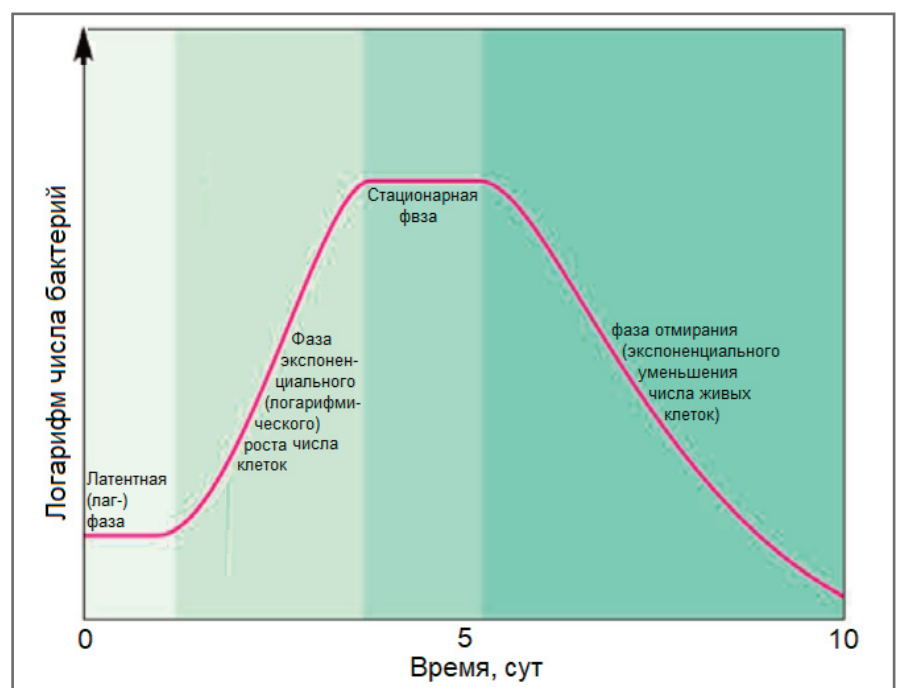


Рис. 3. Изменения числа бактерий в процессе культивирования в жидкой питательной среде

том, что они, как уже указывалось, в естественных условиях обитают в почве, образуют эндоспоры (которые дают возможность выживания в случае экстремальных температурных условий окружающей среды), а в активированном состоянии продуцируют кальцит.

Испытания на рост бактерий ►

Для размножения бактерий использовалась культуральная жидкость (среда В4), включавшая 20 г мочевины, 3 г сухого питательного бульона, 2,12 г NaHCO_3 , 4,14 г CaCl_2 , 10 г NH_4Cl и 1 л воды. Эти компоненты смешивались в определенном порядке и при определенных условиях по специальной методике.

В эту культуральную жидкость при комнатной температуре добавляли активированную культуру бактерий *Bacillus subtilis*. Затем делили полученную смесь на три части и оставляли их на шейкере в инкубаторе (при 30 °С) на 2, 4 и 6 дней. Все эти процессы проводились в стерильных условиях.

Характеристики роста бактерий определялись по кривой, построенной по измеренной мутности жидкой среды с микроорганизмами. Полученная кривая подтвердила известные фазы роста числа бактерий (латентную, экспоненциальную, стационарную, отмирания) (рис. 3).

Латентная фаза (лаг-фаза) – это период задержки размножения клеток, пока идет их адаптация к новой питательной среде после посева.

Фаза экспоненциального (логарифмического) роста характеризуется самой высокой скоростью размножения бактерий, когда каждая клетка в популяции делится на две наиболее часто. (Обычно в конце предыдущего этапа выделяют еще *фазу замедления роста*, когда увеличение количества клеток замедляется из-за постепенного истощения питательных веществ в среде и/или отравления микроорганизмов продуктами их же жизнедеятельности. – *Ред.*).

Во время *стационарной фазы* размножение клеток почти полностью прекращается, но число живых клеток остается максимальным.

Во время *фазы отмирания* становится больше скорость гибели бактерий и количество живых клеток экспоненциально (логарифмически) уменьшается.

Определение физических и механических свойств грунта ►

Из физических свойств исходного грунта определили влажность (содержание воды), пределы Аттерберга (предел пластичности и предел текучести), грану-

лометрический состав и плотность, а также провели стандартное испытание на уплотнение по Проктору для нахождения оптимальной влажности. Для определения механических свойств выполнили испытание этого грунта, доведенного до оптимальной влажности и сформованного нужным образом (контрольного образца), на одноосное сжатие в соответствии со стандартом ASTM D2166-06.

С оставшейся частью грунта, доведенной до оптимальной влажности, выполнили следующие процедуры. Смешивали грунт с культурами бактерий возрастом (после посева) 2, 4 и 6 суток в количестве 4, 6 и 8% от массы грунта с оптимальной влажностью. Затем из этих смесей формовали образцы диаметром 5,5 см и высотой 11 см и выдерживали их в течение 3, 7, 14 и 28 дней для ожидаемого увеличения прочности грунта с помощью жизнедеятельности бактерий *Bacillus subtilis*. Поверхность образцов с бактериями после выдерживания в течение нескольких дней выглядела беловатой (рис. 4). Затем образцы измеряли, взвешивали (рис. 5) и проводили с ними испытания на прочность при одноосном сжатии (рис. 6).

Использовавшиеся в исследовании приборы были предварительно проверены на предмет их состояния, возможностей, а также откалиброваны.

Испытания на одноосное сжатие выполняли для получения значений относительной осевой деформации ϵ , конечной средней площади поперечного сечения A и на этой основе – предела прочности образца при сжатии q_u :

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100; \quad (1)$$

$$A = \frac{A_0}{1 - \epsilon}; \quad (2)$$

$$q_u = \frac{K \times R}{A}, \quad (3)$$

(где L_0 , L – начальная и конечная высота образца соответственно; ΔL – изменение высоты образца; A_0 , A – начальная и средняя конечная площадь поперечного сечения образца соответственно; R – максимальная нагрузка при разрушении; K – безразмерный коэффициент, связанный с высотой образца. – *Ред.*).

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ ►

Были получены следующие результаты лабораторных исследований физических свойств исходного грунта:



Рис. 4. Поверхность образца с бактериями через несколько дней выглядит слегка беловатой



Рис. 5. Образец грунта перед испытанием на одноосное сжатие



Рис. 6. Испытание образца грунта на одноосное сжатие

- исходная влажность W – 12,92% (в тексте у авторов указано также 12,12%. – *Ред.*);
- оптимальная влажность W_c (по результатам стандартного испытания на уплотнение по Проктору) – 32,19%;

- плотность $\rho - 2,63 \text{ г/см}^3$;
- максимальная плотность в сухом состоянии $\rho_d - 1,36 \text{ г/см}^3$;
- предел текучести $LL - 46,89\%$;
- предел пластичности $PL - 31,94\%$;
- число пластичности $PI (I_p) - 14,96\%$;
- предел усадки $SL - 7,49\%$;
- угол внутреннего трения $\varphi - 33^\circ$;
- удельное сцепление $c - 0,65 \text{ кПа}$;
- группа при классификации по системе AASHTO – A-7-5 (глинистый грунт с умеренной и средней пластичностью);
- группа при классификации по системе USCS – ML (в основном пылеватый и мелкозернистый неорганический грунт с низкой пластичностью).

В том числе гранулометрический состав:

- гравий – 3,2%;
- песок – 21,6%;
- пылеватые частицы – 38,32%;
- глинистые частицы – 36,88%.

Пригодность такого грунта для дорожного строительства – от средней до плохой.

Отметим, что для определения места исследованного грунта в Унифицированной системе классификации грунтов (USCS – Unified Soil Classification System) использовалась диаграмма пластичности USCS. В зависимости от предела текучести LL грунты можно разделить на высокопластичные (LL более 50%) и низкопластичные (LL менее 50%) (рис. 7).

Результаты испытаний на одноосное сжатие

Грунт, не усиленный с помощью бактерий, но также доведенный до оптимальной влажности в результате добавления воды и уплотнения по Проктору (контрольный образец), при испытании на одноосное сжатие показал прочность $3,02 \text{ кгс/см}^2$.

На рисунке 8 в графическом виде показаны результаты испытаний на одноосное сжатие образцов грунта, полученных при смешивании с раствором культуры бактерий возрастом 2 суток (после посева в свежую питательную среду) в количестве 4, 6 и 8% от массы грунта с оптимальной влажностью и при последующем выдерживании смеси в течение 3, 7, 14 и 28 суток. Видно, что во всех случаях после выдерживания с бактериями прочность грунта повысилась по сравнению с необработанным контрольным образцом, при этом наиболее сильно – через 28 суток выдерживания после добавления культуры бактерий в количестве 6% по массе ($18,46 \text{ кгс/см}^2$).

На рисунке 9 представлены результаты для аналогичных случаев при исполь-

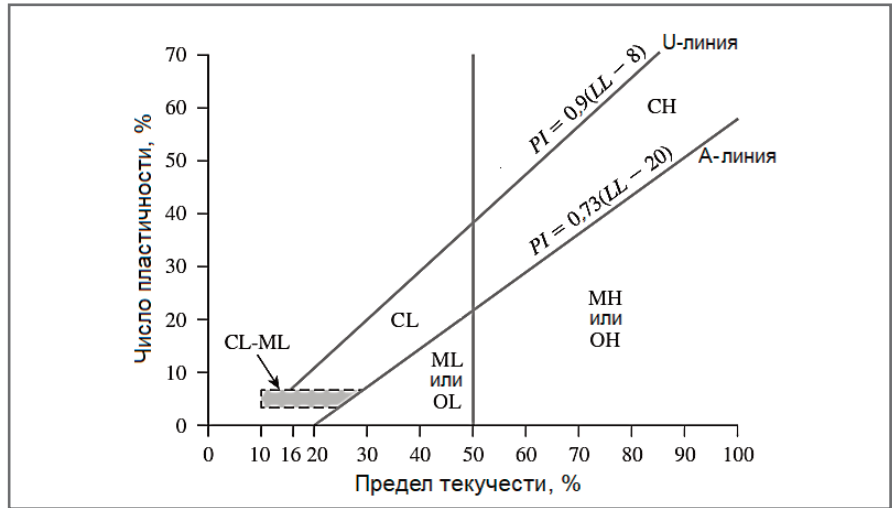


Рис. 7. Диаграмма пластичности по Унифицированной системе классификации грунтов (USCS – Unified Soil Classification System)

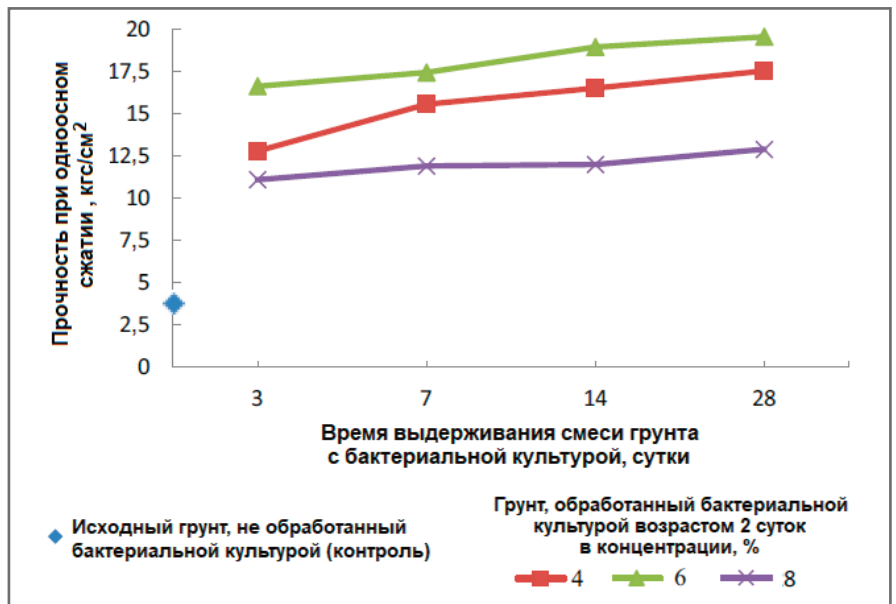


Рис. 8. Результаты испытаний на одноосное сжатие образцов грунта, обработанных раствором культуры бактерий возрастом 2 суток

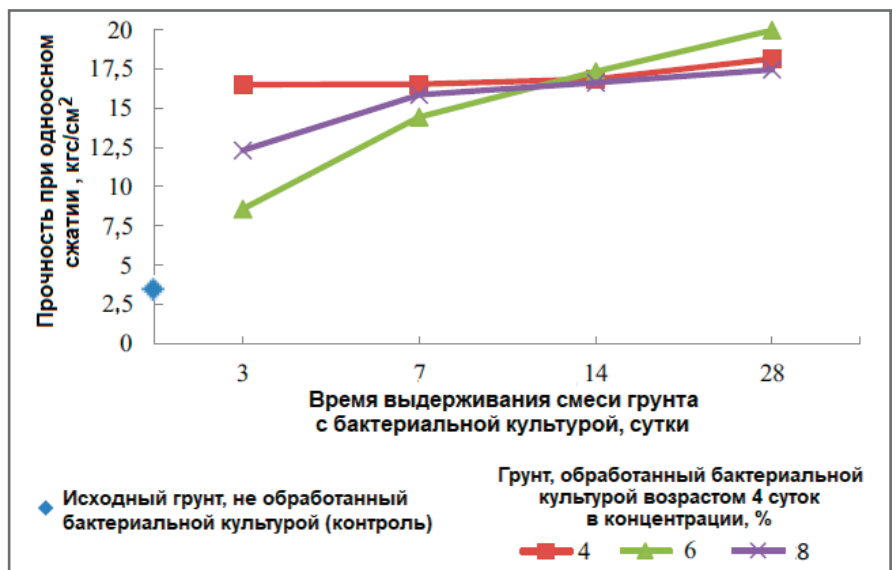


Рис. 9. Результаты испытаний на одноосное сжатие образцов грунта, обработанных раствором культуры бактерий возрастом 4 суток

зовании раствора бактериальной культуры возрастом 4 суток. Здесь также во всех случаях после выдерживания с бактериями прочность грунта повысилась по сравнению с контрольным образцом. Самую большую прочность набрал образец, обработанный раствором культуры бактерий в количестве 6% по массе через 28 суток выдерживания (19,96 кг/см²).

На рисунке 10 показаны результаты для аналогичных случаев при использовании раствора бактериальной культуры возрастом 6 суток. Видно, что во всех случаях после выдерживания с бактериями прочность грунта повысилась по сравнению с контрольным образцом, но после выдерживания с бактериями более 3 суток она уже не становилась выше или даже немного снижалась. Самая высокая прочность (чуть меньше 17 кгс/см²) была у образца, обработанного раствором бактериальной культуры в количестве 8% по массе через 3 суток выдерживания.

Таким образом, результаты испытаний показали, что оптимальным для усиления грунта является добавление 4-дневной культуры бактерий в количестве 6% от массы грунта с оптимальной влажностью и выдерживание в течение 28 дней. В этом случае прочность грунта на одноосное сжатие повысилась примерно в 6 раз по сравнению с необработанным бактериями грунтом.

Объяснить оптимальность использования 4-дневной культуры можно просто. Через 4 суток после посева наступает высшая (стационарная) фаза раз-

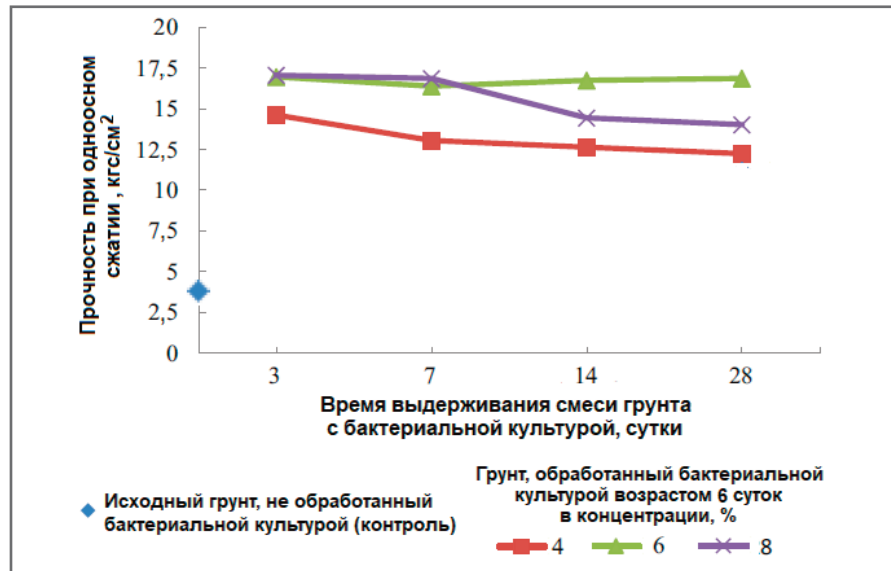


Рис. 10. Результаты испытаний на одноосное сжатие образцов грунта, обработанных раствором культуры бактерий возрастом 6 суток

вития бактериальной культуры (см. рис. 3), поэтому уровень продукции кальцита в это время больше по сравнению с 6-дневной культурой, уже вступившей в фазу отмирания (и уж тем более по сравнению с 8-дневной).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ►

По результатам испытаний, самая высокая прочность грунта на одноосное сжатие (19,96 кгс/см²) получилась при добавлении раствора 4-дневной культуры бактерий *Bacillus subtilis* в количестве 6% от массы грунта с оптимальной влажностью при 28 сутках выдержива-

ния. Ее значение увеличилось в 6 раз по сравнению с необработанным бактериями грунтом (прочность которого была всего 3,02 кгс/см²).

Следует подчеркнуть, что данное исследование проводилось в лабораторных условиях. Далее следует провести полномасштабные исследования в обозначенном направлении в полевых условиях, где, кроме того, надо будет проверить воздействие жизнедеятельности бактерий *Bacillus subtilis* на грунт при разных природных условиях (прохладных, жарких, сухих, влажных, дождливых), а также при динамично изменяющихся условиях. И

Источник для перевода ►

(Source for the translation) ►

Alkadri, Djameluddin A.R., Harianto T., Arsyad A. The compressive strength of cohesive soil stabilized with microbial induced cementation // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1117. 4th International Conference on Civil and Environmental Engineering 03.08.2022–05.08.2022, Kuta, Bali, Indonesia. Article №. 012045. DOI: 10.1088/1755-1315/1117/1/012045. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1117/1/012045>.

Список литературы, использованной автором переведенной статьи ►

(References used by the author of the translated article) ►

- DeJong J.T., Mortensen B.M., Martinez B.C., Nelson D.C. Bio-mediated soil improvement // *Ecol. Eng.* 2010. Vol. 36. № 2. P. 197–210.
- Oliveira P.J.V., Freitas L.D., Carmona J.P.S.F. Effect of soil type on the enzymatic calcium carbonate precipitation process used for soil improvement // *J. Mater. Civ. Eng.* 2017. Vol. 29. № 4. P. 1–7.
- Mujah D., Cheng L., Shahin M.A. Microstructural and geomechanical study on biocemented sand for optimization of MICP process // *J. Mater. Civ. Eng.* 2019. Vol. 31. № 4. P. 1–10.
- Indriani A.M., Harianto T., Djameluddin A.R., Arsyad A. Bioremediation of coal contaminated soil as the road foundations layer // *Int. J. GEOMATE*. 2021. Vol. 21. № 84. P. 76–84.
- Harianto T., Hamzah S., Nur S.H., Abdurrahman M.A., Latief R.U., Fadliyah I., et al. Biogrouting stabilization on marine sandy clay soil // *Proc. 7th Int. Conf. Asian Pacific Coasts. (APAC 2020)*. 2020. P. 848–852.
- Phang I.R.K., Wong K.S., Chan Y.S., Lau S.Y. Effect of microbial-induced calcite precipitation towards tropical organic soil // *Proc. AIP Conf.*, 2018. 2020. P. 1–6.
- Hasriana, Samang L., Djide M.N., Harianto T. A study on clay soil improvement with *Bacillus subtilis* bacteria as the road subbase layer // *Int. J. GEOMATE*. 2018. Vol. 15. № 52. P. 114–120.
- Mwandira W., Nakashima K., Kawasaki S. Bioremediation of lead-contaminated mine waste by *Pararhodobacter* sp. based on the microbially induced calcium carbonate precipitation technique and its effects on strength of coarse and fine grained sand // *Ecol. Eng.* 2017. Vol. 109. P. 57–64. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.09.011>.