

УДК 624.154.5

ИССЛЕДОВАНИЯ ПОВЫШЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ МЕТОДОМ ЦЕМЕНТАЦИИ

Н.Г. Серегин¹, В.И. Запруднов²

¹ФГБОУ ВО «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское ш., д. 26

²МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), 141005, Московская обл., г. Мытищи, ул. 1-я Институтская, д. 1

SereginNG@mgsu.ru

Представлен обзор видов грунтов, преобладающих в регионе Западной Сибири Российской Федерации. Проанализированы составы и физико-механические свойства грунтов. Особое внимание уделено лёссовым просадочным грунтам. Сформулирована и поставлена задача получения однородной цементогрунтовой смеси. Рассмотрена технологическая схема изготовления цементогрунтовых свай фундаментов зданий и сооружений буросмесительным способом с механоактивацией. Приведены методы укрепления лёссовых просадочных грунтов. Определены методы исследования свойств цементогрунтовых свай фундаментов зданий и сооружений. Проведен многофакторный эксперимент по оценке параметров, влияющих на свойства цементогрунтовых свай. По результатам исследований сформулированы выводы и рекомендации.

Ключевые слова: связные грунты, суглинки, глины, супеси, несвязные песчаные грунты, каменистые грунты, коренные массивные породы, лессовые грунты, свайный фундамент, цементогрунты, цементогрунтовая

смесь, просадочность грунтов, цементогрунтовые сваи, буросмесительный способ, механоактивация грунтов, комплексный метод

Ссылка для цитирования: Серегин Н.Г., Запруднов В.И. Исследования повышения несущей способности грунтов оснований методом цементации // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 5. С. ??–??. DOI

Связные грунты (суглинки, глины, супеси) распространены почти на всей территории Западной Сибири только **на незначительных территориях** расположены несвязные песчаные грунты. Подходящие для строительства каменные грунты неравномерно расположены в этом регионе. Коренные массивные породы чаще недоступны для разработки, поскольку залегают на глубине от 1000 до 3000 м и более. В южной части Западной Сибири на значительных по площади участках распространены лёссовые грунты.

Состоят лёссовые грунты в основном из глины и суглинков. Лёссовые грунты являются хорошим материалом для сооружения свайных фундаментов из цементогрунтов, благодаря своим физико-механическим и химическому составу, включающему глинистые частицы, щелочную среду, легкорастворимые соли и т. д. Их легко разрабатывать и размельчать, так как они обладают высокой структурной пористостью и рыхлым составом. Лёссовые грунты легкого гранулометрического состава, такие как суглинки и супеси, из-за наличия в них карбоната кальция обладают высокой прочностью и морозостойкостью, поэтому наиболее пригодны к укреплению их цементом.

Цель работы

Целью работы является получение однородной цементогрунтовой смеси, включающей в себя не более 1 % частиц грунта крупнее 5 мм, возможно, с помощью механоактивации грунта.

Материалы и методы

Однородность цементогрунтовой смеси обеспечивают бурсмесительным способом, увлажняя стружку лёссового грунта до тягучего состояния и смешивая ее с цементным раствором. Цементогрунт можно получить, используя смеси из супесчаных грунтов, содержащих до 15 % глинистых частиц. В этом случае расход цемента снижается почти вдвое, благодаря механоактивации грунтов.

Целью улучшения свойств лессовых грунтов является борьба с их просадочностью. Преодолеть просадочность лессовых грунтов можно только прорезкой всей просадочной толщи сваями фундаментов [1, 2]. Сооружение фундаментов на цементогрунтовых сваях по сравнению с ленточными обеспечивает существенную экономию цемента, снижение объема земляных работ, исключает необходимость изготовления опалубки и, как следствие, ускоряет выполнение нулевого цикла в 1,5–2 раза [3–7]. При этом монтаж цементогрунтовых свай бурсмесительным способом с механоактивацией позволяет сооружать свайные фундаменты рядом с существующими зданиями или сооружениями без опасения их разрушения.

Бурсмесительный способ изготовления цементогрунтовых свай фундаментов зданий и сооружений заключается в применении бурсмесителей, размельчающих грунт в скважине без выемки его на поверхность с одновременным введением в размельченный грунт цементного раствора (рис. 1).

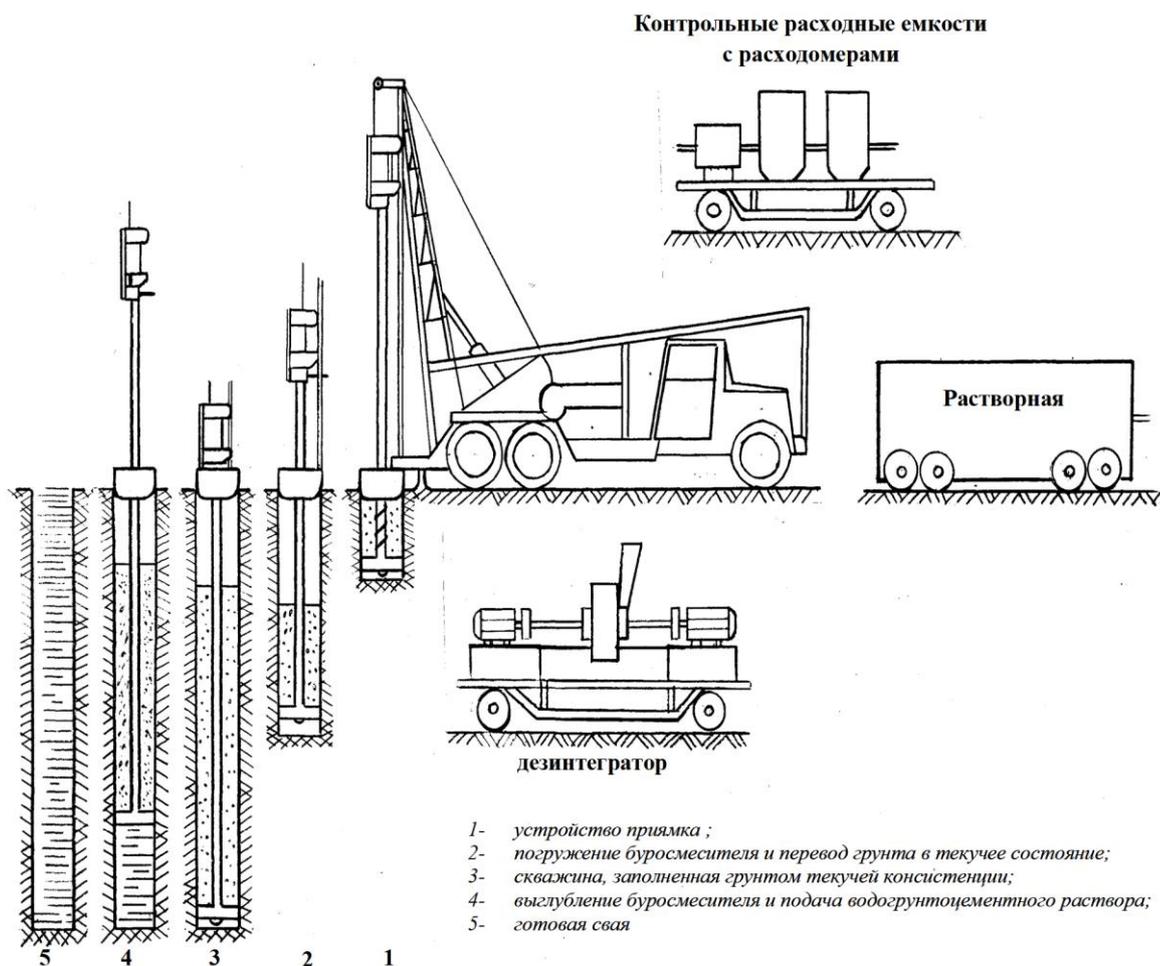


Рис. 1. Технологическая схема изготовления цементогрунтовых свай бурсмесительным методом

Fig. 1. Technological scheme of production of cement-based piles by drilling and mixing method

Одним из важных достоинств бурсмесительного способа изготовления цементогрунтовых свай фундаментов зданий и сооружений является способность закреплять все виды слабых и структурно-неустойчивых грунтов. Бурсмесительный способ наиболее перспективен при укреплении лёссовых просадочных грунтов [1, 2]. Он может быть применен затем для сооружения новых свайных фундаментов, а также и для реконструкции существующих.

К числу наиболее перспективных методов укрепления лёссовых просадочных грунтов следует особо отнести комплексные методы укрепления грунтов [3], сочетающие в себе воздействие на грунт добавок различных связующих и активных химических реагентов, например поверхностно-активных веществ (ПАВ). Одним из этих методов является метод механоактивации грунтов, позволяющий уменьшить расход цемента и повысить прочность цементогрунтовых свай.

Образование структуры цементогрунтов происходит в два этапа:

- 1) перемешивание компонентов;
- 2) уплотнение параллельно с мелкодисперсным измельчением.

Обволакивание грунтов при перемешивании происходит с потерей поверхностной энергии, и внешняя энергия уходит на перемешивание грунтов и преодоление внутреннего трения.

При наличии смачивания за счет сил дисперсионного и химического взаимодействия происходит сцепление между грунтом и связующим. С увеличением удельной поверхности грунта повышается прочность структуры при условии сохранения удельного содержания связующего на единицу поверхности грунта. Значительные скорости стружкообразования грунтов, свойственные цементогрунтам, способствуют образованию аморфных структур, имеющих малую пластичность, но высокую прочность.

Известно, что одним из основных аналитических методов исследования является метод планирования экспериментов [8, 9], позволяющий сократить количество опытов путем уменьшения числа уровней варьирования факторов. Другим наиболее перспективным методом исследований следует считать метод математического моделирования [10, 11] которому свойственно повышение эффективности и сокращение времени исследований. Комплексное сочетание при проведении исследований методом математического моделирования и планирования экспериментов позволяет выполнить работу на достаточном уровне точности и в кратчайшие сроки [3].

В исследованиях, рассмотренных в настоящей статье для создания модели эксперимента выбран вероятностно-детерминированный метод [3, 12].

Результаты исследования

Результаты исследований, полученные вероятностно-детерминантным методом [3, 12], представлены в виде графиков (рис. 2, рис. 3 и рис. 4).

На графиках изображены две кривые:

– теоретических результатов исследования: ;

– экспериментальных результатов исследования: .

При проведении многофакторного эксперимента варьировались следующие параметры, влияющие на свойства цементогрунтовых свай:

- влияние типа грунта на показатели его прочности при сжатии и раскалывании (рис. 2);
- влияние количества цемента в зависимости от его доли в объеме механоактивированного грунта на показатели его прочности (рис. 3);
- влияние содержания ПАВ на прочность цементогрунтов (рис. 4).

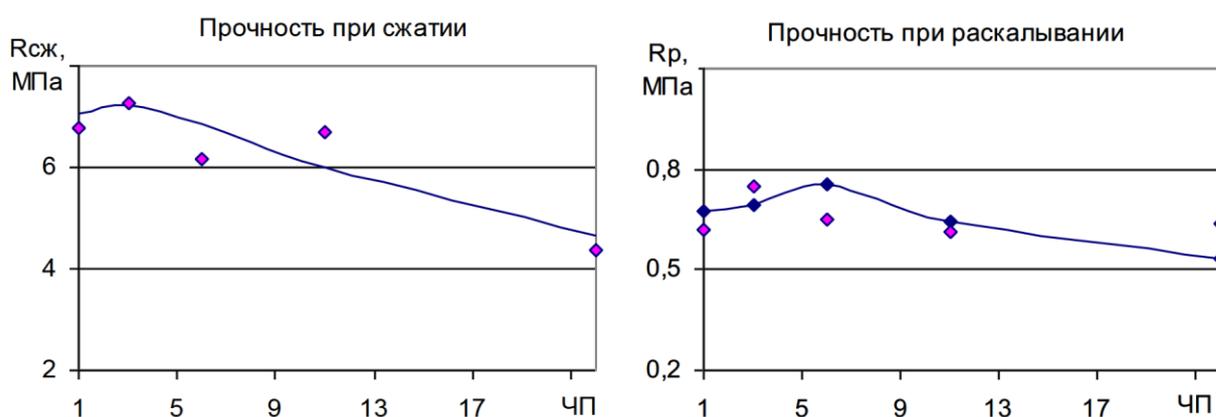


Рис. 2. Влияние типа грунта на показатели его прочности при сжатии и раскалывании

Fig. 2. The influence of soil type on the performance of its compressive strength and cracking

Максимальная прочность достигнута при моделировании грунта типа супесь. С увеличением значения пластичности прочность при раскалывании уменьшается равномерно. По мере увеличения в грунте количества песчаных частиц изменяется структура смеси, поэтому максимальная прочность приходится на песчаный грунт. При небольшом количестве песка цементогрунт обретает коагуляционную структуру, в которой крупные зерна погружены в цементирующее вещество и не образуют взаимных контактов.

При дальнейшем насыщении структуры грунта крупными зернами она переходит в коагуляционно-конденсационную структуру, а затем в конденсационно-коагуляционную. Впоследствии зерна склеиваются незначительной прослойкой цементирующих веществ и образуется плотный каркас. Прочность цементогрунта увеличивается. Однако, при этом снижается его пластичность и возрастает хрупкость (рис. 3).

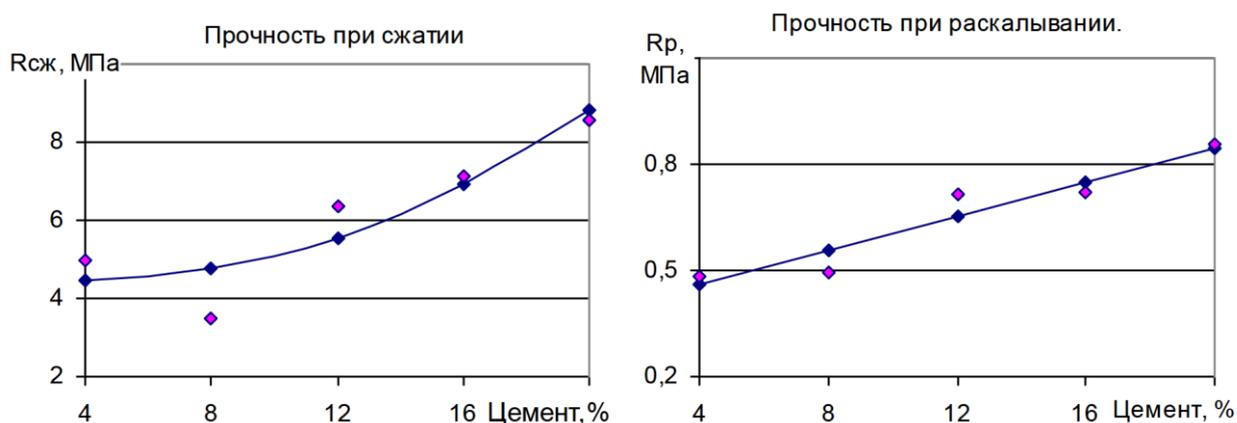


Рис. 3. Влияние количества цемента в зависимости от его доли в объеме механоактивированного грунта на показатели его прочности

Fig. 3. Influence of the amount of cement depending on its share in the volume of mechanically activated soil on its strength indicators

Увеличение количества цемента в зависимости от его доли в объеме механоактивированного грунта увеличивает прочность грунта на сжатие и скалывание, потому что объема цемента в объеме смеси увеличивается

количество связей, которые образуются в результате кристаллизации структуры. Наибольший эффект повышения прочности цементогрунта происходит при введении более 12 % цемента [3], благодаря тому, что частицы связующего равномерно распределяются по объему цементогрунта.

Однако, это характерно только для повышения прочности при сжатии, так как прочность цементогрунта с высоким содержанием цемента в смеси практически не влияет на растяжение.

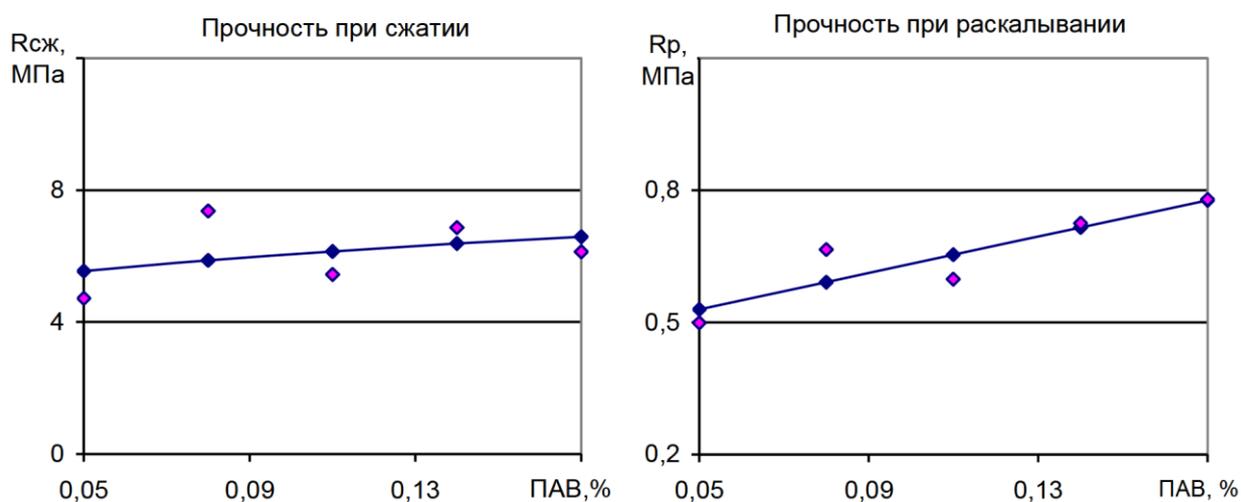


Рис. 4. Влияние содержания ПАВ на прочность цементогрунтов

Fig. 4. Influence of the content of surfactants on the strength of cement substrates

Для повышения морозостойкости цементогрунтовой смеси и интенсификации образования новых кристаллических связей в нее в качестве ПАВ был добавлен глицериновый гудрон, который, при этом, является отходом химической промышленности.

При введении в цементогрунт 0,1 % ПАВ в следствие их адсорбции его второго слоя прочность цементогрунта уменьшается. При адсорбции третьего слоя ПАВ прочность цементогрунта вновь увеличивается. Таким образом, при введении ПАВ прочность цементогрунта увеличивается волнообразно. Цементогрунт при растяжении достигает максимальную

прочность при введении 0,17 % ПАВ, а при сжатии 0,08 % ПАВ относительно объема цементогрунта.

Выводы и рекомендации

1. Лучшим грунтом для укрепления цементом является супесь.
2. Эффект активации грунтового компонента уменьшается с первых минут выдержки молотого компонента на воздухе, поэтому сразу после активации его следует вводить в смесь. Временной резерв составляет не более трех часов.
3. Дальнейшее увеличение доли молотого грунтового компонента не должно превышать 30-35 %, так как ее дальнейшее увеличение не обеспечивает ощутимый рост прочности.
4. Наибольший рост прочности цементогрунтов в зависимости от доли введённых механоактивированных компонентов обеспечивается введением в смесь до 12 % цемента. Дальнейшее увеличение доли цемента нецелесообразно, поскольку он не увеличивает прочность цементогрунта.
5. Добавка ПАВ эффективна только в объеме 0,08 % относительно массы смеси.

Список литературы / References

- [1] Sakai T., Nakano M. Interpretation of the mechanical behavior of embankments having various compaction properties based on the **soil** skeleton structure // Soils and Foundations, 2015, no. 55, pp. 1069–1085.
- [2] Kumor Ł.A., Kumor M.K. Changes in mechanical parameters of soil, considering the effect of additional compaction of embankment // Transportation Research Procedia, 2016, no. 14, pp. 787–796.
- [3] Seregin N. An integrated way to improve the properties of soil-cement pile foundations // Journal E3S Web of Conferences, 2020, no. 157, p. 06006.

[4] Ang J.B., Fredriksson P.G. Trade, Global Policy, and the Environment: New Evidence and Issues // *Journal of Comparative Economics*, 2018, no. 46, pp. 616–633.

[5] Garmanov G., Urazaeva N. The paper presents design and calculation of cost effectiveness of various types of foundations on the example of the city of Vologda // *Procedia Engineering*, 2015, no. 117, pp. 465–475.

[6] Aguiar dos Santos R., Rogério Esquivel E. Saturated anisotropic hydraulic conductivity of a compacted lateritic soil // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2018, no. 10, pp. 986–991.

[7] Lu Z., Xian S., Yao H., Fang R., She J. Influence of freeze-thaw cycles in the presence of a supplementary water supply on mechanical properties of compacted soil // *Cold Regions Science and Technology*, 2019, no. 157, pp. 4252.

[8] Kante N., Kryshchuk M., Lavendels J. Charged Particle Location Modeling Based Experiment Plan Acquisition Method // *Procedia Computer Science*, 2017, v. 104, pp. 592–597.

[9] Baraffe H.D., Cosson M., Bect J., Delille G., Francois B. A novel non-intrusive method using design of experiments and smooth approximation to speed up multi-period load-flows in distribution network planning // *Electric Power Systems Research*, 2018, v. 154, pp. 444–451.

[10] Hong Y., Wang Y., Wu J., Jiao L., Chang X. Developing a mathematical modeling method for determining the potential rates of microbial ammonia oxidation and nitrite oxidation in environmental samples // *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2018, v. 133, pp 116–123.

[11] Jayanudin J., Fahrurrozi M., Wirawan S.K., Rochmadi R. Mathematical modeling of the red ginger oleoresin release from chitosan-based microcapsules using emulsion crosslinking method // *Engineering Science and Technology*, 2019, v. 22, iss. 2, pp. 458–467.

[12] Stephenson C.L., Harris C.A. An assessment of dietary exposure to glyphosate using refined deterministic and probabilistic methods // *Food and Chemical Toxicology*, 2016, v. 95, pp 28–41.

Сведения об авторах

Серегин Николай Григорьевич — канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), SereginNG@mgsu.ru

Запруднов Вячеслав Ильич — д-р техн. наук, профессор МГТУ им. Н.Э. Баумана (Мытищинский филиал), zaprudnov@mgul.ac.ru

Поступила в редакцию 2020.

Принята к публикации 2020.

RESEARCH OF PROPERTIES OF CEMENT-SOIL PILES OF FOUNDATIONS OF BUILDINGS AND STRUCTURES

N.G. Seregin¹, V.I. Zaprudnov²

¹Moscow State Building University (NIU MGSU), 26, Yaroslavl highway, 129337, Moscow, Russia

²BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

SereginNG@mgsu.ru

The review of soil types prevailing in Western Siberia of the Russian Federation is presented. The compositions and physical and mechanical properties of soils are analyzed. Special attention is paid to loess subsidence soils. The problem of obtaining a homogeneous cement-ground mixture is formulated and set. The technological scheme of production of cement-ground piles of foundations of buildings and structures by drilling-mixing method with mechanical activation is considered. Considers methods of strengthening the loess subsidence of soils.

Methods for studying the properties of cement-based piles of foundations of buildings and structures are formulated. A multi-factor experiment was conducted to evaluate the parameters that affect the properties of cement-based piles. Based on the research results, conclusions and recommendations are formulated.

Keywords: coherent soils, loams, clays, sandy loam, non-coherent sandy soils, stony soils, indigenous massive rocks, loess soils, pile Foundation, cement-based soils, cement-based mixture, subsidence of soils, cement-based piles, drilling and mixing method, mechanical activation of soils, complex method

Suggested citation: Seregin N.G., Zaprudnov V.I. *Issledovaniya povysheniya nesushchey sposobnosti gruntov osnovaniy metodom tsementatsii* [Research of properties of cement-soil piles of foundations of buildings and structures]. *Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin*, 2020, vol. 24, no. 5, pp. ??–??. DOI

Authors' information

Seregin Nikolay Grigorievich — Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Moscow State Building University (NIU MGSU), SereginNG@mgsu.ru

Zaprudnov Vyacheslav Il'ich — Dr. Sci. (Tech.), Professor of the BMSTU (Mytishchi branch), zaprudnov@mgul.ac.ru

Received 2020.

Accepted for publication 2020.

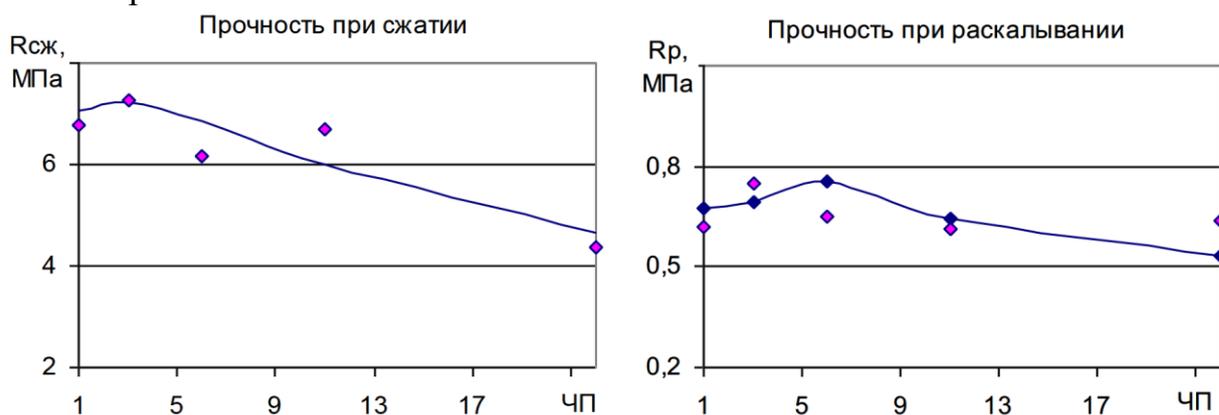


Рис. 2. Влияние типа грунта на показатели его прочности при сжатии и раскалывании.

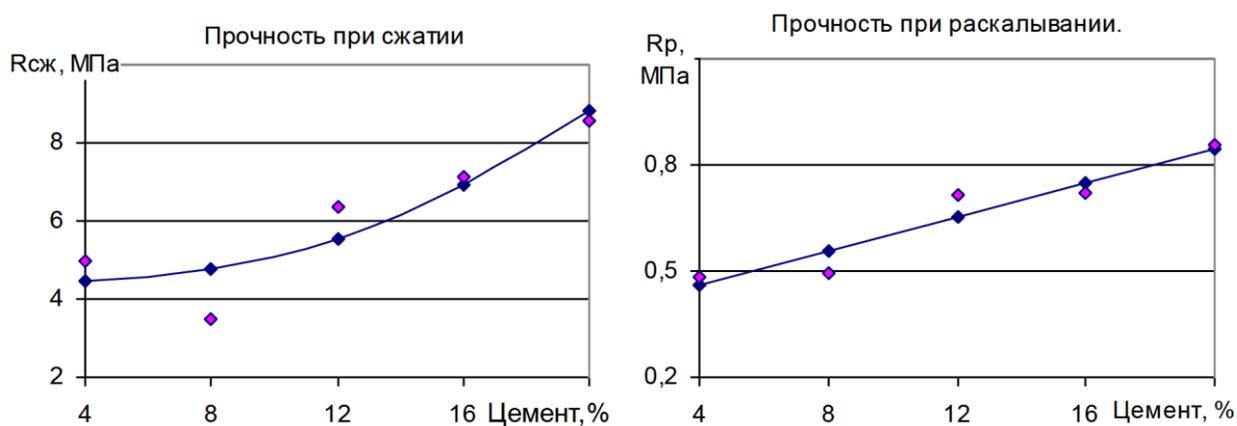


Рис. 3. Влияние количества цемента в зависимости от его доли в объеме механоактивированного грунта на показатели его прочности.

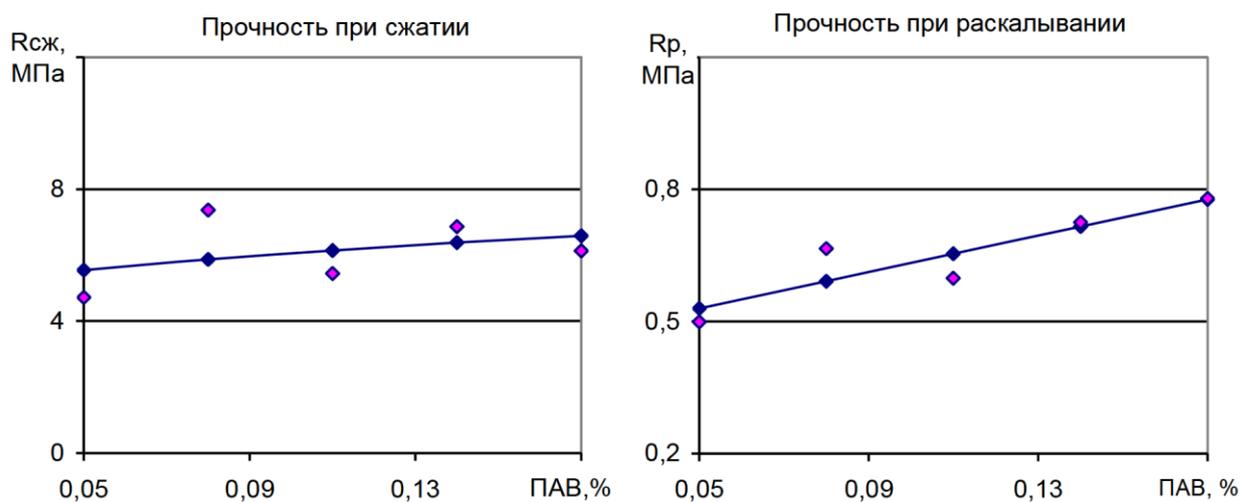


Рис. 4. Влияние содержание ПАВ на прочность цементогрунтов.