

УДК 624.154.5

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ СОСТАВОВ  
ЦЕМЕНТОГРУНТОВ ПРИ УСТРОЙСТВЕ СВАЙНЫХ  
ФУНДАМЕНТОВ БУРОСМЕСИТЕЛЬНЫМ СПОСОБОМ**

**Н.Г. Серегин<sup>1</sup>, В.И. Запруднов<sup>2</sup>**

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

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

SereginNG@mgsu.ru

Представлен анализ структур грунтов на территории Западной Сибири Российской Федерации. Рассмотрены условия добычи грунтов для сооружения фундаментов. Обоснована целесообразность применения лессовых грунтов для устройства свайных фундаментов с применением цементогрунтов. Проанализирован метод оценки физико-механических свойств грунтов для устройства свайных фундаментов буромесильным способом. Определен основный показатель грунта — мера его хрупкости. Изучена кривая зависимости напряжения в материале грунта от деформации. Исследованы физические показатели лессовидных грунтов различных территориальных районов Российской Федерации. Даны рекомендации формирования оптимального состава грунта для укрепления его цементом при устройстве свайных фундаментов буромесильным способом.

**Ключевые слова:** свайный фундамент, цементогрунты, буросмесительный способ, лесовые грунты, напряжение, деформация, мера хрупкости, фракции песка, число пластичности

**Ссылка для цитирования:** Серегин Н.Г., Запруднов В.И. Определение оптимальных составов цементогрунтов при устройстве свайных фундаментов буросмесительным способом // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 5. С. ??–??. DOI

Устройству свайных фундаментов с применением цементогрунтов буросмесительным способом посвящены многие научные работы [1–7]. Поскольку на территории Западной Сибири преобладают связные грунты: глины, суглинки, реже супеси. Несвязные грунты, к которым относятся песчаные и гравелистые, встречаются на относительно небольших территориях. Пригодные для строительства каменные материалы размещены на территории Западной Сибири весьма неравномерно. Массивные каменные породы в пределах Западно-Сибирской низменности практически недоступны для разработки, так как залегают на глубине до 1000…3000 м. и более [8–15]. Обширные территории в южной части Западной Сибири занимают лесовые грунты. Их северная граница проходит примерно по линии Томск — Тюмень [16–20]. Лесовые грунты представлены главным образом глинами и суглинками. Они обладают благоприятными физическими и химическими свойствами, необходимыми для устройства свайных фундаментов с применением цементогрунтов, в связи с тем, что в своем составе содержат небольшое количество глинистых частиц и легкорастворимых солей, а также обладают щелочной реакцией среды [21–27]. Высокая структурная пористость лесовых грунтов, имеющих рыхлое сложение, облегчает их разработку и измельчение. Наиболее пригодными к укреплению цементом признаны лесовые грунты легкого гранулометрического состава, в том числе легкие суглинки и супеси, которые

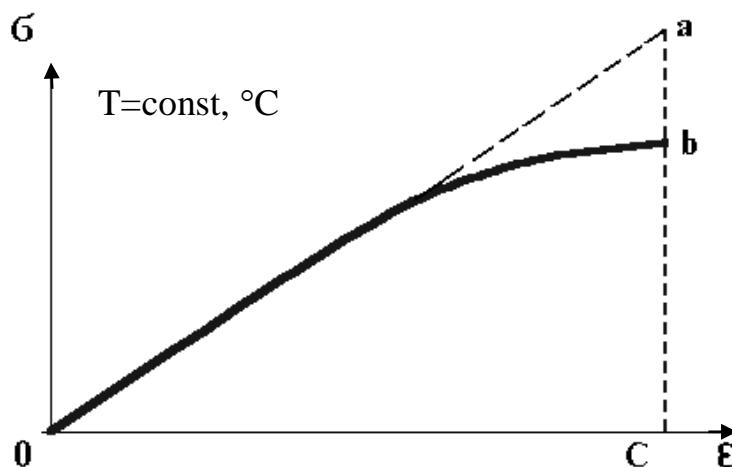
в силу наличия в их составе карбоната кальция обладают высокими показателями прочности и морозостойкости.

## Цель работы

Цель работы – установление закономерностей по основным прочностным характеристикам грунтов при устройстве свайных фундаментов с применением цементогрунтов буромесильным способом.

## Материалы и методы

Для определения оптимального состава цементогрунта при устройстве свай буромесильным способом проведены экспериментальные исследования с целью установления основных прочностных характеристик грунтов. Механическое состояние материалов с учетом фактора времени определяет характер зависимости напряжение — деформация. Мера хрупкости определена методом анализа кривой зависимости напряжения от деформации. По результатам испытаний образцов материала при расчетной температуре можно построить график зависимости  $\sigma = f(\varepsilon)$  (рис. 1).



**Рис. 1.** Зависимость напряжения  $\sigma$  от деформации  $\varepsilon$ .

**Fig. 1.** Dependence of the stress  $\sigma$  on the strain  $\varepsilon$ .

На рис. 1 линией 0a экстраполирован линейный участок нагружения кривой 0b. За меру хрупкости грунта принято отношение двух площадей, а именно фактической площади под кривой 0bC к теоретически возможной площади 0aC:

$$\chi = \frac{\int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_0^{\varepsilon_p} A\varepsilon d\varepsilon} = \frac{A\varepsilon_p^2}{2 \int_0^{\varepsilon_p} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}, \quad (1)$$

где  $\chi$  — мера хрупкости грунта;  $A$  — угловой коэффициент линейного участка кривой  $\sigma = f(\varepsilon)$ .

Критерием его хрупкости грунта служить кривизна зависимости  $\sigma = f(\varepsilon)$ , определяемая по формуле

$$k = \frac{d^2\sigma / d\varepsilon^2}{\left[ 1 + \left( \frac{d\sigma}{dt} \right)^2 \right]^{3/2}}. \quad (2)$$

Для определения кривизны зависимости  $\sigma = f(\varepsilon)$  ее необходимо представить в аналитическом виде и, дважды проинтегрировав, подставить в формулу (2). Однако кривизна, являясь функцией деформации, изменяется от нуля на начальном прямолинейном участке нагружения до своего максимального значения в момент, предшествующий разрушению. Из этого следует, что необходимым условием при оценке критерия хрупкости должен быть учет характера кривой и его изменения на всем деформационном интервале от начала нагружения до разрушения. Это условие можно реализовать путем определения площади под кривой  $\sigma = f(\varepsilon)$  с включением ее в критерий.

По своему физическому смыслу мера хрупкости грунта является энергетической величиной, поскольку отношение фактической площади под кривой  $0bC$  к теоретически возможной площади  $0aC$  можно рассматривать, как отношение энергий — фактически затраченной энергии на разрушение с учетом ее рассеивания к энергии идеального упругого деформирования. Чем меньше отличаются значения этих площадей, тем выше хрупкость грунта. В исключительном случае, при линейности зависимости  $\sigma = f(\varepsilon)$  вплоть до разрушения, рассмотренные выше площади равны между собой. Т. е. мера хрупкости составляет  $\chi = 1$ , что соответствует абсолютно хрупкому состоянию грунта, уменьшающемуся с уменьшением меры хрупкости  $\chi$ .

## **Результаты исследования**

По мере хрупкости грунта можно судить о его структуре. Кривая зависимости меры хрупкости грунта от некоторого его физического параметра даёт возможность утверждать, что ординатой на ней является наличие кристаллизационной структуры в материале исследуемого грунта, а часть, расположенная выше кривой отражает коагуляционную структуру в материале грунта.

Физико-механические свойства цементогрунта во многом зависят от его гранулометрического состава. В таблице представлены результаты исследования некоторых физических показателей лессовидных грунтов различных районов Российской Федерации.

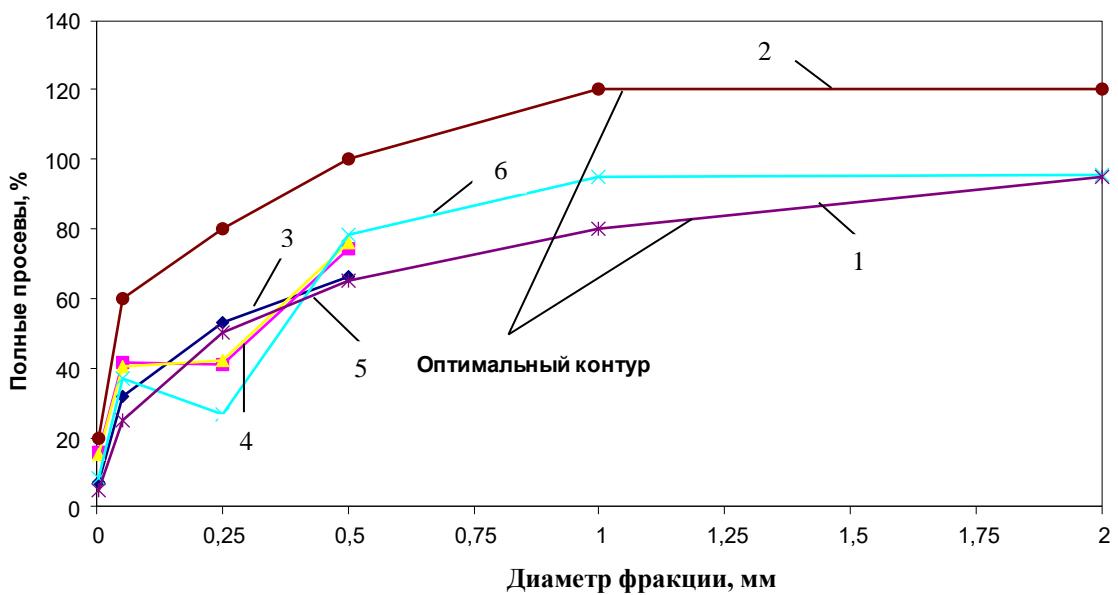
Таблица

## Физические показатели грунтов

## Physical characteristics of soils

Наименование грунта	Частные остатки на ситах, %								Характеристика влажности, %		
	2,0–1,0	1,0–0,5	0,5–0,25	0,25–0,1	0,1–0,05	0,05–0,01	0,01–0,005	0,005	Граница текучести	Граница раскатаивания	Число пластичности
Омская супесь легкая	–	–	8,2	23,5	29,6	18,3	13,3	7,05	17,8	14,3	3,5
Омский суглинок легкий пылеватый	–	–	1,7	13,5	27,5	31,4	10,3	15,7	31,0	18,1	12,9
Новосибирский суглинок легкий	–	–	2,03	13,8	28,4	30,0	10,7	15,1	–	–	–
Кировская супесь	4,4	5,2	16,7	13,8	12,6	21,2	18,2	8,05	32,6	24,8	7,8
Кировский песок	0,5	5,7	52,1	27,3	12,0	2,26	–	–	–	–	–

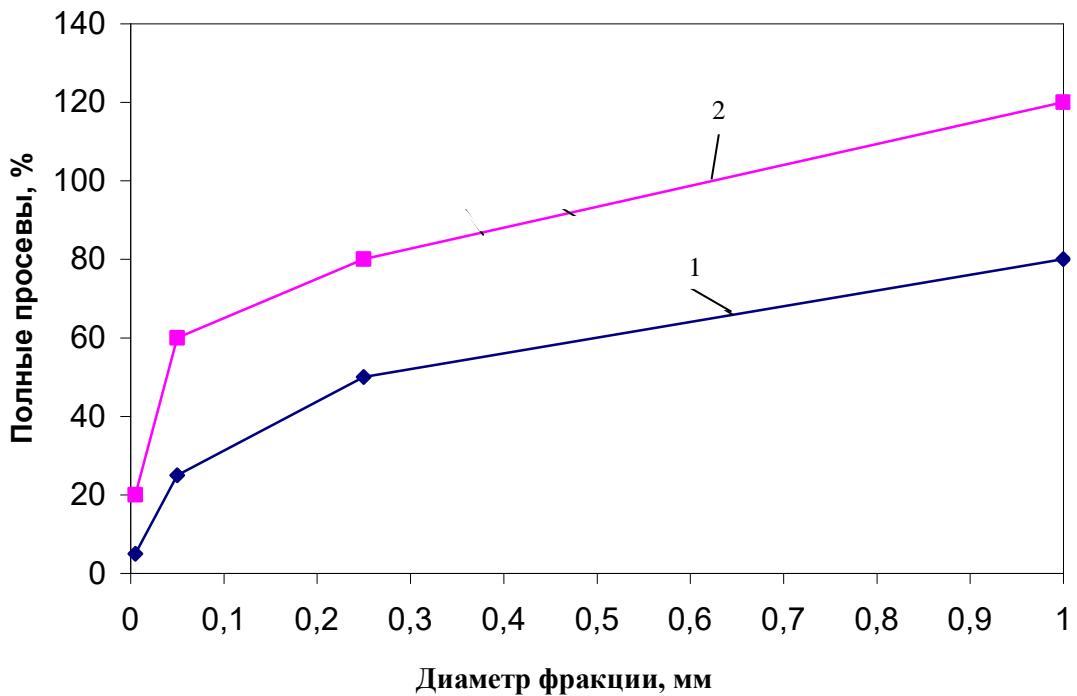
Анализируя физические свойства исследованных лессовидных грунтов, представленные в таблице, следует обратить внимание на то, что у большинства из них не обнаружена фракция крупнозернистого песка от 0,5 до 2,0 мм, а содержание основных скелетных фракций цементогрунта, а содержание частиц средней крупности незначительно (рис. 2).



**Рис. 2.** Оптимальный состав грунтовой смеси: 1 — нижний оптимальный контур; 2 — верхний оптимальный контур; 3 — Омская супесь, лёгкая; 4 — Новосибирский суглинок, лёгкий; 5 — Омский суглинок, пылеватый; 6 — Кировская супесь.

**Fig. 2.** Optimal compositions of the soil mixture: 1 — the lower optimal contour; 2 — the upper optimal contour; 3 — Omsk sandy loam, light; 4 — Novosibirsk loam, light; 5 — Omsk loam, dusty; 6 — Kirov sandy loam.

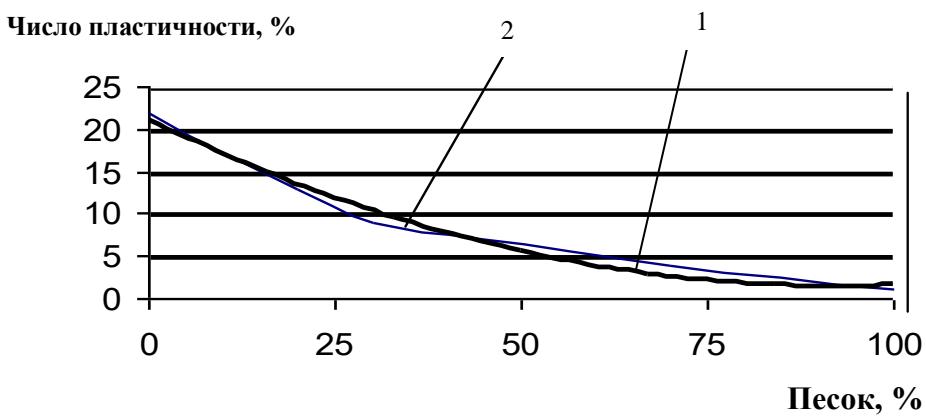
Однако, гранулометрический состав природных грунтов, приведенный на рис. 2, не укладывается в оптимальный контур, представленный на рис. 3.



**Рис. 3.** Оптимальный контур грунтов, применяемых для изготовления цементогрунтовых свай: 1 — нижний оптимальный контур; 2 — верхний оптимальный контур.

**Fig. 3.** The optimal contour of the soils used for the manufacture of cement-ground piles: 1 — the lower optimal contour; 2 — the upper optimal contour.

При подборе оптимального состава грунта для укрепления его цементом при устройстве свайных фундаментов буросмесительным способом в суглинок необходимо вводить различное количество песка. Такой подход к моделированию различных типов грунтов возможен за счет изменения их числа пластичности. Число пластичности грунта является функцией от содержания в суглинке песчаной фракции, что подтверждает рис. 4.



**Рис. 4.** Зависимость числа пластичности от содержания песчаной фракции, %: 1 — экспериментальная кривая; 2 — кривая, аппроксимированная функцией  $Y = 0,0023x^2 - 0,427x + 21,137$ .

**Fig. 4.** The dependence of the plasticity number on the content of the sand fraction, %: 1 — the experimental curve; 2—the curve approximated by the function  $Y = 0,0023x^2 - 0,427x + 21,137$ .

Прочность при сжатии грунта достигла почти 7 МПа после введения в суглинок в количестве 25 % массы песка и практически не изменилась до введения 80 %.

## Выводы

1. Основным показателем грунта является его мера хрупкости.
2. По своему физическому смыслу мера хрупкости грунта является энергетической величиной.
3. Рассмотренный метод анализа зависимости напряжения от деформации позволяет качественно оценивать меру хрупкости грунта.
4. Физико-механические свойства цементогрунта во многом зависят от гранулометрического состава грунта.
5. При устройстве свайных фундаментов буросмесительным способом, в суглинок необходимо вводить различное количество песка.

6. Число пластиичности грунта является функцией от содержания в суглинке песчаной фракции.

7. После введения в суглинок по массе 25% песка прочность при сжатии грунта достигает почти 7 МПа.

### **Список литературы / References**

[1] Seregin N. An integrated way to improve the properties of soil-cement pile foundations // J. E3S Web of Conferences, 2020, no. 157, p. 06006.

[2] Seregin N.G. Feasibility for the implementation of cement piles // J. OP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, no. 953, p.012093.

[3] Серегин Н.Г., Запруднов В.И. Исследования повышения несущей способности грунтов оснований методом цементации // Лесной вестник / Forestry Bulletin, 2020. Т. 24. № 5. С. 104–108. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-104-108

[4] Ang J.B., Fredriksson P.G. Trade, Global Policy and the Environment: New Evidence and Issues // J. 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 // J. 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] Запруднов В.И., Стриженко В.В. Основы строительного дела. М.: МГУЛ, 2008. 460 с.

[9] 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.

[10] 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.

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

[12] Hong Z. Executive labor market segmentation: How local market density affects incentives and performance // J. of Corporate Finance, 2018, v. 50, pp 1–21.

[13] Garmanov G., Urazaeva N. Design and Calculation of Cost Effectiveness of Various Types of Foundations in Central Russia // Procedia Engineering, 2015, v. 117, pp. 465–475.

[14] Baril G.L., Wright J.C. Different types of moral cognition: Moral stages versus moral foundations // Personality and Individual Differences, 2012, v. 53, iss. 4, pp. 468–473.

[15] Kong G., Cao T., Hao Y., Zhou Y., Ren L. Thermomechanical properties of an energy micro pile — raft foundation in silty clay // Underground Space, 2019, no. 6 (3), pp. 1–9.

[16] Li J., Wang X., Guo Y., Yu X. Vertical bearing capacity of the pile foundation with restriction plate via centrifuge modelling // Ocean Engineering, 2019, v. 181, pp 109–120.

[17] Santos R., Esquivel E. Saturated anisotropic hydraulic conductivity of a compacted lateritic soil // J. of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018, v. 10, iss. 5, pp. 986–991.

[18] Lu Z., Xian Sh., 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, v. 157, pp. 42–52.

[19] 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, v. 55, iss. 5, pp. 1069–1085.

[20] Kumor Ł.A., Kumor M.K. Changes in Mechanical Parameters of Soil, Considering the Effect of Additional Compaction of Embankment // Transportation Research Procedia, 2016, v. 14, pp. 787–796.

[21] Zhao R., Hui R., Liu L., Xie M., An L. Effects of snowfall depth on soil physical-chemical properties and soil microbial biomass in moss – dominated crusts in the Gurbantunggut Desert, Northern China // CATENA, 2018, v. 169, pp. 175–182.

[22] Zhang Q., Shao M., Jia X., Wei X. Changes in soil physical and chemical properties after short drought stress in semi-humid forests // Geoderma, 2019, v. 338, pp. 170–177.

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

[24] 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.

[25] 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.

[26] 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.

[27] 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 2021.

Принята к публикации 2021.

## **DETERMINATION OF OPTIMAL COMPOSITIONS OF CEMENT PRIMERS IN THE CONSTRUCTION OF PILE FOUNDATIONS BY DRILLING AND MIXING METHOD**

**N.G. Seregin<sup>1</sup>, V.I. Zaprudnov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Moscow State Building University (NIU MGSU), 26, Yaroslavl highway, 129337, Moscow, Russia

<sup>2</sup>BMSTU (Mytishchi branch), 1, 1st Institutskaya st., 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

SereginNG@mgsu.ru

The analysis of soil structures in the territory of Western Siberia of the Russian Federation is given. The conditions of soil extraction for the construction of foundations are considered. The expediency of using loess soils for the construction of pile foundations with the use of cement primers is justified. The purpose of the work is formulated. A method for evaluating the physical and mechanical properties of soils for the construction of pile foundations by drilling and mixing method is considered. The main indicator of the soil for achieving this goal, which is a measure of its fragility, is determined. The curve of the

dependence of the stress in the soil material on the deformation is considered and analyzed. The physical parameters of loess-like soils of various territorial regions of the Russian Federation are studied. Recommendations for the formation of the optimal composition of the soil for strengthening it with cement in the construction of pile foundations by drilling and mixing method are given.

**Keywords:** pile foundation, cement grounds, drilling method, loess soils, stress, deformation, brittleness measure, sand fractions, plasticity number

**Suggested citation:** Seregin N.G., Zaprudnov V.I. *Opredelenie optimal'nykh sostavov tsementogruntov pri ustroystve svaynykh fundamentov burosmesitel'nym sposobom* [Determination of optimal compositions of cement primers in the construction of pile foundations by drilling and mixing method]. Lesnoy vestnik / Forestry Bulletin, 2021, vol. 25, 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 2021.

Accepted for publication 2021.

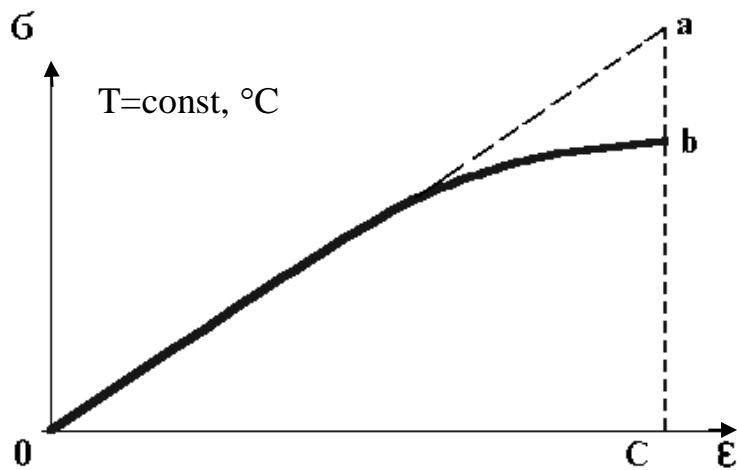


Рис. 1. Зависимость напряжения  $\sigma$  от деформации  $\epsilon$ .

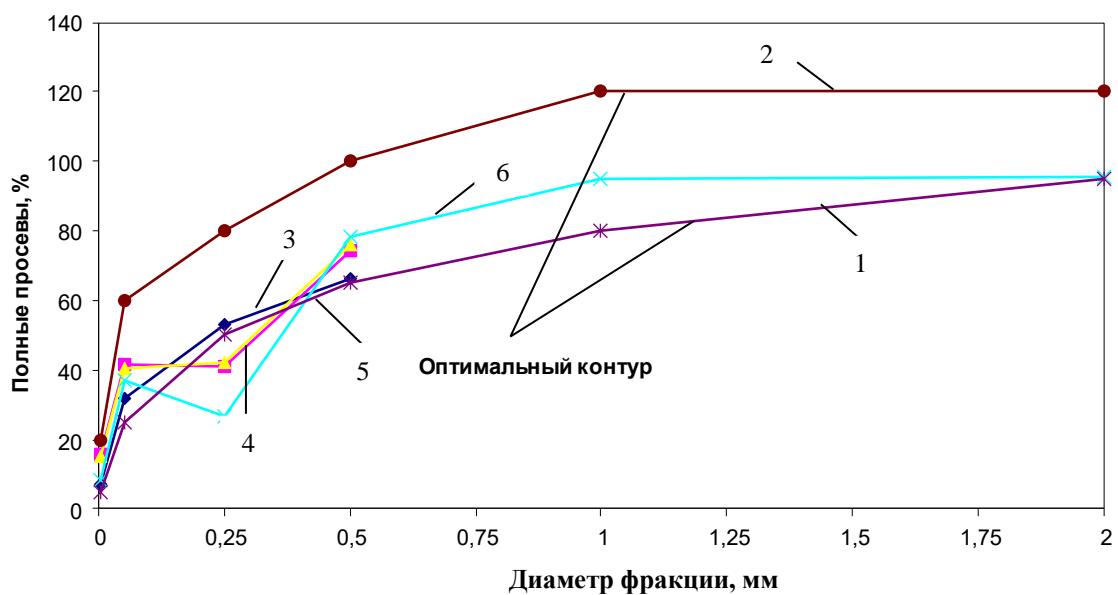
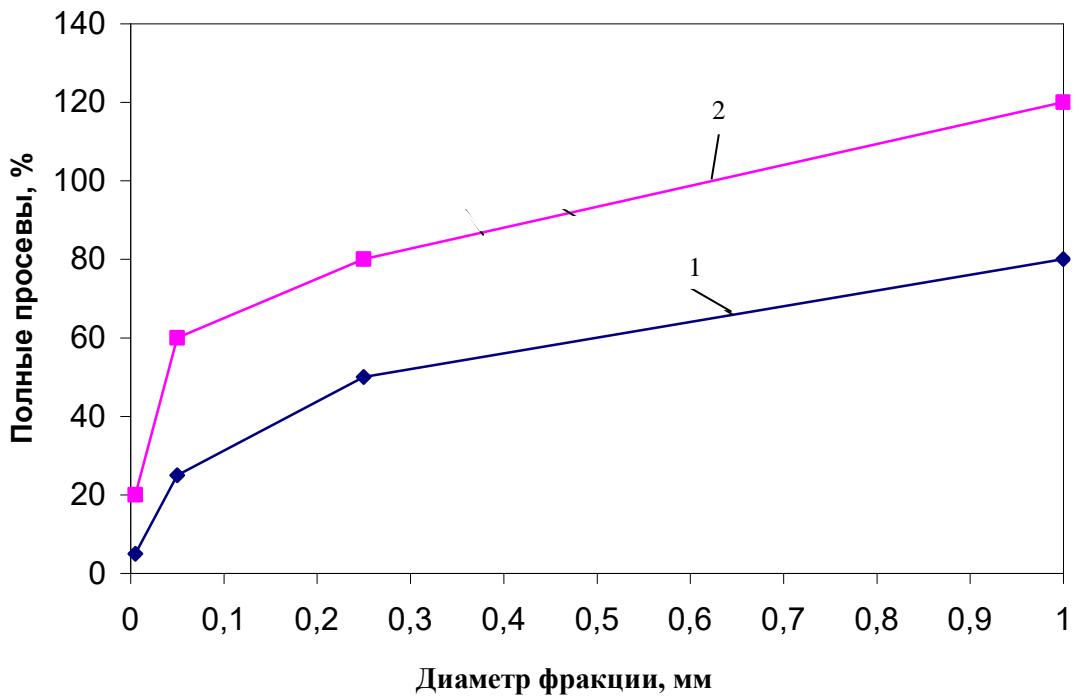
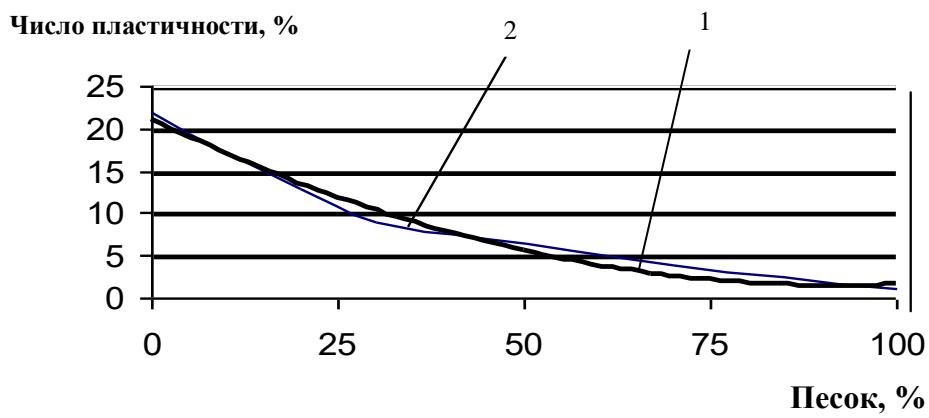


Рис. 2. Оптимальный состав грунтовой смеси: 1 — нижний оптимальный контур; 2 — верхний оптимальный контур; 3 — Омская супесь, лёгкая; 4 — Новосибирский суглинок, лёгкий; 5 — Омский суглинок, пылеватый; 6 — Кировская супесь.



**Рис. 3.** Оптимальный контур грунтов, применяемых для изготовления цементогрунтовых свай: 1 — нижний оптимальный контур; 2 — верхний оптимальный контур.



**Рис. 4.** Зависимость числа пластичности от содержания песчаной фракции, %: 1 — экспериментальная кривая; 2 — кривая, аппроксимированная функцией  $Y = 0,0023x^2 - 0,427x + 21,137$ .