

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 625.12.033.38

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БАРХАННЫХ ПЕСКОВ, СЛАГАЮЩИХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЕ ЗЕМЛЯНОЕ ПОЛОТНО*

Корнилов С.Н.¹, Абдукамилов Ш.Ш.²¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Россия² Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, Узбекистан

Аннотация. В данной работе приведены результаты лабораторных исследований изменения прочностных характеристик барханных песков при действии вибродинамической нагрузки. Даны количественные показатели значений удельного сцепления и угла внутреннего трения барханных песков при действии статических и вибродинамических нагрузок. Предложены зависимости определения прочностных характеристик барханных песков с учетом вибродинамической нагрузки в расчетах прочности железнодорожного земляного полотна.

Ключевые слова: барханные пески, сцепление, угол внутреннего трения, вибродинамическая нагрузка, земляное полотно, методика условно-мгновенного разрушения, трехосное напряженное состояние, лабораторные исследования.

Введение

Надежность и безопасность железнодорожного пути в значительной степени зависит от несущей способности основной площадки и устойчивости откосов земляного полотна. На основную площадку земляного полотна приходится наибольшее величины вибродинамического воздействия проходящих поездов. Недостаточная несущая способность грунтов земляного полотна приводит к возникновению дефектов и деформаций основной площадки, что вызывает повышенные затраты на содержание пути. Практика эксплуатации железных дорог показывает, что проблема обеспечения несущей способности земляного полотна становится особенно острой на линиях, где полотно полностью отсыпано из барханных песков. Барханные пески по своим прочностным характеристикам значительно уступают крупно- и среднезернистым пескам.

Ранее выполненными исследованиями установлено [1–11], что прочность грунтов земляного полотна не является постоянной величиной. Она может изменяться в зависимости от свойств и состояния грунтов, а также от величины и интенсивности вибродинамического воздействия. Закономерность изменения удельного сцепления и угла внутреннего

трения при росте вибродинамического воздействия является основной определяющей состоянием и способности барханных песков сопротивляться действию внешних нагрузок. Установление аналитической связи между изменением прочностных характеристик и величиной вибродинамического воздействия дает возможность проведения расчетов несущей способности барханных песков, уложенных в железнодорожное земляное полотно.

Для изучения степени влияния вибродинамического воздействия на прочностные характеристики барханных песков нами были проведены лабораторные исследования.

Исследования проводились на установке, сконструированной на кафедре «Управление и технология строительства» Петербургского государственного университета путей сообщения. Основой для установки послужил стабилометр типа «А» по Сипидину [10], в котором создается всестороннее гидростатическое давление. Конструкция установки моделирует вибродинамическое воздействие периодическим изменением гидростатического давления в рабочей камере стабилометра.

Величина пульсации гидростатического давления определяется следующим выражением:

$$\Delta P = P_d \sin \omega t + P_d' \sin n \omega t, \quad (1)$$

где P_d и P_d' – дополнительные давления от несущей и наложенной гармоник пульсации, МПа; ω –

* Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ № 14-38-50720.

угловая частота, 1/с; t – время, с; n – отношение угловых частот гармоник.

Полная величина всестороннего давления

$$P = P_0 + \Delta P, \quad (2)$$

где P_0 – статическое всестороннее давление, МПа.

Осциллограмма пульсации напряжений в рабочей камере стабилометра представлена на рис. 1.

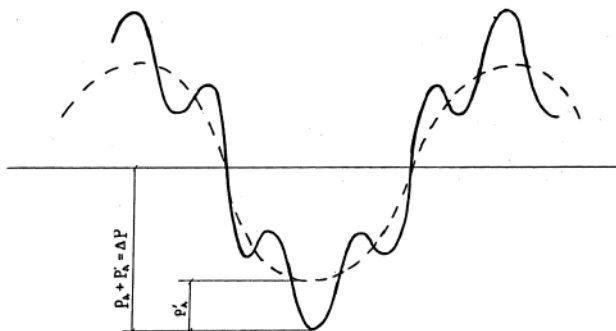


Рис. 1. Осциллограмма пульсации напряжений в рабочей камере стабилометра

Методика подготовки и испытания образцов из барханных песков

Исследование влияния вибродинамического воздействия на прочностные свойства барханных песков осуществлялось на образцах нарушенного сложения. Барханные пески привезены в лабораторию из действующей линии Учкудук – Мискен Узбекских железных дорог, где земляное полотно полностью отсыпано из этих песков.

Требуемая плотность определялась исходя из результатов лабораторного определения максимальной плотности грунтов с использованием прибора Союздорнии для стандартного уплотнения грунтов, в соответствии с ГОСТ 22733-2002 [12]. Результаты определения максимальной плотности барханных песков представлены на рис. 2. Максимальная плотность характеризуется изменением плотности сухого барханного песка с увеличением влажности. Оптимальная влажность для исследуемого песка на основе результатов наших экспериментов составила 10%.

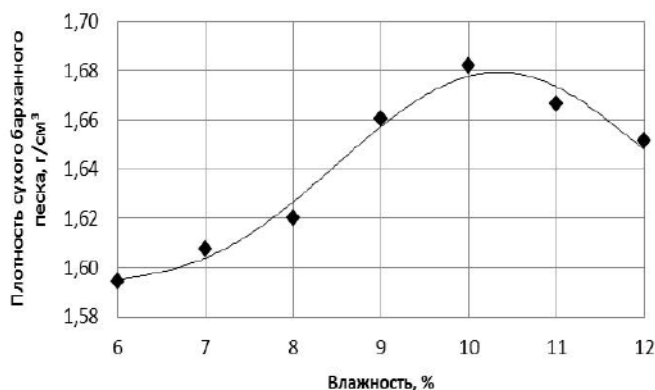


Рис. 2. Максимальная плотность барханных песков

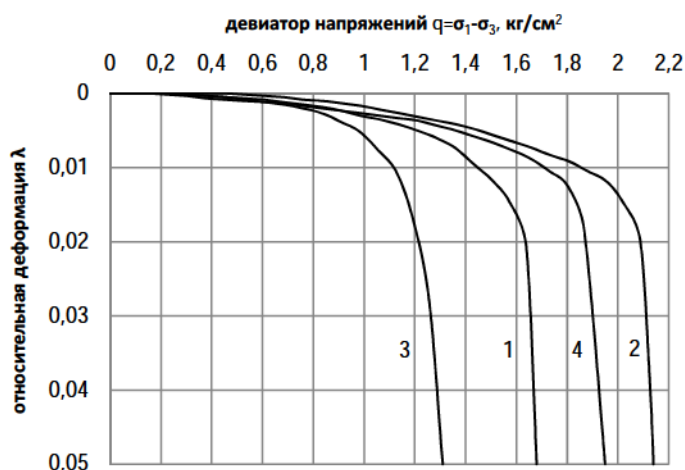


Рис. 3. Зависимость относительной деформации барханных песков от девиатора напряжений при влажности 10% и коэффициенте уплотнения, равном 1: 1 – в статике, всестороннее давление $\sigma_3=0,25$ кгс/см²; 2 – в статике, всестороннее давление $\sigma_3=0,5$ кгс/см²; 3 – в динамике, всестороннее давление $\sigma_3=0,25$ кгс/см²; 4 – в динамике, всестороннее давление $\sigma_3=0,5$ кгс/см²

В естественных условиях нагрузки на грунты земляного полотна возрастают очень быстро и действуют сравнительно короткое время. При этом процесс консолидации песчаного грунта растянут по времени, а соответственно его естественная плотность и влажность существенно не меняются в момент прохода поезда. Поэтому лабораторные исследования изменения прочности барханных песков, воспринимающих вибродинамическую нагрузку, выполнялись по методике условно-мгновенного разрушения.

По результатам испытаний каждого образца строилась графическая зависимость (рис. 3) развития относительной деформации λ от девиатора напряжений q , которые определяются по следующим формулам:

$$\lambda = \frac{\Delta h}{h}, \tag{3}$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3, \tag{4}$$

где h – первоначальная высота образца; Δh – величина продольной деформации; σ_1 и σ_3 – значения главных напряжений, действующих на образец из песка.

Для определения прочностных характеристик барханных песков в наших экспериментах в камере стабилметра создавалось гидростатическое давление, равное 0,25 и 0,5 кгс/см². Полученные при этих значениях бокового давления величины разрушающих избыточных напряжений позволили построить круги Мора, по огибающим к которым можно определить значения сцепления и угла внутреннего трения.

Результаты лабораторных испытаний по определению прочностных характеристик барханных песков при статике и при действии вибродинамической нагрузки представлены в таблице.

Прочностные характеристики барханных песков при действии статической и вибродинамической нагрузок

Влажность, %	c , т/м ²	φ , град	$c_{дин}$, т/м ²	$\varphi_{дин}$, град	k_c	k_φ
6	0,4	35	0,32	26	0,200	0,257
8	0,58	33	0,48	25	0,172	0,242
10	0,67	31	0,58	24	0,134	0,226
12	0,62	29	0,52	22	0,161	0,241

Для оценки влияния вибродинамического воздействия на прочностные характеристики барханных песков использовались показатели относительного снижения сцепления и угла внутреннего трения, предложенные И.В. Прокудиным [1], соответственно определяемые в процентах или долях единицы по следующим формулам:

$$k_c = \frac{c_{ст} - c_{дин}}{c_{ст}}, \tag{5}$$

$$k_\varphi = \frac{\varphi_{ст} - \varphi_{дин}}{\varphi_{ст}}, \tag{6}$$

где $c_{ст}$ и $\varphi_{ст}$ – сцепление и угол внутреннего трения при действии статической нагрузки; $c_{дин}$ и $\varphi_{дин}$ – сцепление и угол внутреннего трения при действии вибродинамической нагрузки.

В отдельных случаях использовался показатель соотношения характеристик:

$$k'_c = \frac{c_{дин}}{c_{ст}}, \tag{7}$$

$$k'_\varphi = \frac{\varphi_{дин}}{\varphi_{ст}}. \tag{8}$$

Изменения прочностных характеристик барханных песков от влажности при вибродинамическом воздействии

В лабораторных испытаниях исследовалось изменение сцепления и угла внутреннего трения в зависимости от влажности, которые определяют предельное сопротивление барханных песков. Результаты исследования зависимости показателя относительного снижения сцепления и угла внутреннего трения от влажности барханных песков представлены на рис. 4.

Полученные зависимости убедительно свидетельствуют о значительном снижении сцепления барханных песков при действии вибродинамической нагрузки. Интервал относительного снижения удельного сцепления барханных песков k_c находится в интервале 13–20%, что для песчаных грунтов следует принять как достаточно высокими. Анализ зависимости, представленной на рис. 4, показывает, что при увеличении влажности барханных песков до оптимальной величины относительное снижение удельного сцепления достигает своих минимальных значений. Однако увеличение влажности барханных песков выше оптимальной величины приводит к возрастанию относительного снижения удельного сцепления k_c . Можно объяснить это тем, что увлажнение барханных песков до оптимальной влажности дает возможность уплотнить грунт до максимальной плотности. Многочисленными исследованиями ряда ученых доказано [1, 6, 7, 9–11], что уплотнение грунтов способствует уменьшению их виброчувствительности. Совершенно очевидно, что с позиции обеспечения надежности и

устойчивости железнодорожного земляного полотна желательнее уплотнять барханный песок до максимальных значений.

Из данных, представленных на рис. 4, следует, что характер зависимости относительного снижения угла внутреннего трения соответствует относительному снижению удельного сцепления. Это свидетельствует о единстве природы явлений, обуславливающих снижение прочностных характеристик барханных песков при вибродинамических нагрузках. При этом результаты испытаний показывают, что угол внутреннего трения более чувствителен к вибродинамическим воздействиям по сравнению с удельным сцеплением. Интервал значений коэффициента относительного снижения угла внутреннего трения k_ϕ для барханных песков находится в пределах 22–26%.

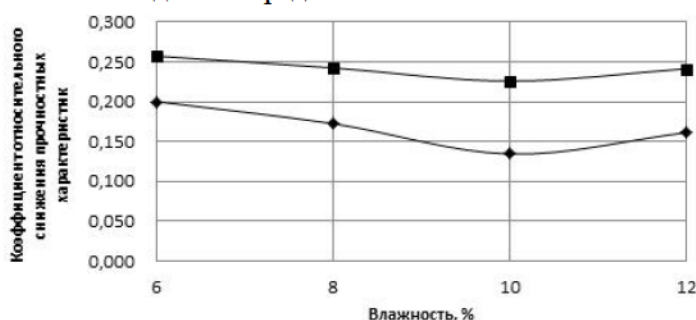


Рис. 4. Зависимость показателя относительного снижения прочностных характеристик барханных песков от влажности

Изменение прочностных характеристик барханных песков в зависимости от вибродинамического воздействия

Влияние пульсации напряжений на изменение прочностных характеристик барханных песков исследовалось на образцах, изготовленных из барханных песков с оптимальной влажностью, которая равняется 10%. Объемная масса образцов соответствовала максимальному значению, определенному при стандартном уплотнении с указанной влажностью. Пульсация напряжений создавалась с помощью гидродинамического генератора пульсации напряжений с максимальной амплитудой колебаний.

Результаты исследования зависимости показателей относительного снижения сцепления и угла внутреннего трения от пульсаций напряжений представлены на рис. 5.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что с возрастанием величины пульсации напряжений увеличиваются значения показателей относительного снижения сцепления и угла внутреннего трения. Следует отметить, что характер повышения k_c и k_ϕ не имеет

принципиальных различий.

Из рисунка следует, что графики удельного сцепления и угла внутреннего трения при динамике в зависимости от пульсации напряжений имеют ярко выраженный экспоненциальный характер. Кроме того, учитывая наличие прямолинейной зависимости между пульсацией напряжений и амплитудами колебаний песчаных грунтов земляного полотна, зависимости, полученные Прокудиным И.В. [1], примут следующий вид:

$$c_{дин} = c_{ст} \left[k'_c + k_c e^{-k(A_{зв} - A_n)} \right], \quad (9)$$

$$\phi_{дин} = \phi_{ст} \left[k'_\phi + k_\phi e^{-kA_{зв}} \right], \quad (10)$$

где $A_{зв}$ – амплитуда колебаний барханных песков в рассматриваемой точке поперечного сечения земляного полотна, мкм; A_n – начальная амплитуда колебаний, мкм, для барханных песков $A_n=440$ мкм [5]; k – коэффициент виборазрушения при оценке вибродинамического воздействия по величине амплитуд колебаний барханных песков. Коэффициент виборазрушения грунта определяется экспериментальным путем. Он характеризует интенсивность нарастания показателей относительного снижения прочностных характеристик барханных песков при увеличении вибродинамического воздействия.

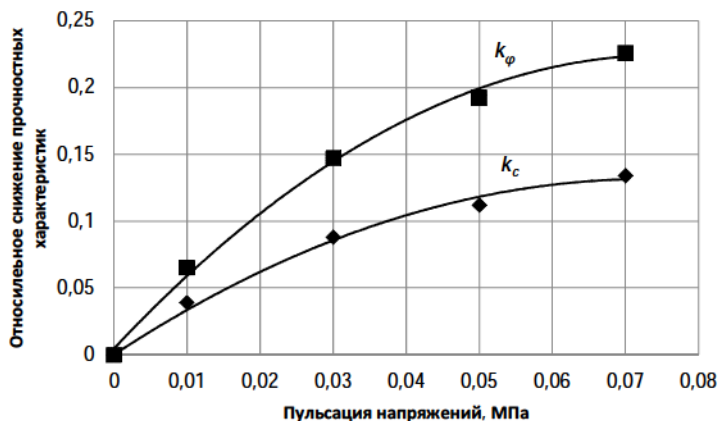


Рис. 5. Зависимость показателя относительного снижения прочностных характеристик барханных песков от величины пульсации напряжений

Зависимости (9) и (10) хорошо описывают изменение прочностных характеристик барханных песков при увеличении вибродинамического воздействия. Из данных рис. 5 следует, что имеет место полное совпадение расчетных и экспериментальных результатов. Поэтому выражения (9) и (10) рекомендуется использовать при расчетах несущей способности железнодорожного земля-

ного полотна из барханных песков.

Очевидно, что исследование влияния вибродинамических нагрузок на снижение прочностных свойств барханных песков в зависимости от региональных условий имеет большое научное и практическое значение. В настоящее время для определения несущей способности земляного полотна из барханных песков рекомендуется экспериментальное определение значений k_c и k_ϕ . Для барханных песков, распространенных в пустынях Средней Азии, в подавляющем большинстве случаев они будут близки к приведенным в **таблице**.

Заключение

Выполненные исследования изменения прочностных характеристик барханных песков под влиянием вибродинамической нагрузки позволяют сделать следующие выводы:

1. Снижение прочностных характеристик барханных песков железнодорожного земляного полотна происходит под влиянием вибродинамического воздействия, нарушающего силы контактного взаимодействия между элементарными частицами барханных песков.

2. При увеличении влажности барханных песков в сторону оптимальной величины коэффициент снижения удельного сцепления достигает своих минимальных значений, при дальнейшем увеличении влажности песков этот коэффициент возрастает. Такое положение дел наблюдается и при исследовании снижения угла внутреннего трения в зависимости от влажности барханных песков.

3. Плотность барханных песков железнодорожного земляного полотна в значительной степени влияет на снижение прочностных характеристик грунта. Только при наличии в земляном полотне объемной массы скелета грунта, с оптимальной влажностью, создаются условия, предотвращающие существенное снижение прочностных характеристик под влиянием вибродинамического воздействия.

4. По результатам экспериментальных исследований установлены максимальные значения показателей относительного снижения сцепления k_c и угла внутреннего трения k_ϕ для барханных песков различного состояния. Величины названных показателей приведены в **таблице** и рекомендуются к применению в проектных и научно-исследовательских разработках.

5. Мелкозернистые и среднезернистые пес-

ки по исследованиям О.А. Савинова, А.Ф. Колоса, М.Н. Гольдштейна [6, 9, 11] снижают свои прочностные характеристики k_c на 18–22%, k_ϕ на 13–15%, что значительно меньше зарегистрированных в наших исследованиях. При сопоставлении пылеватых песков с барханными песками наблюдается снижение удельного сцепления и угла внутреннего трения на 10–13%. В этом заключается основное отличие и определенная опасность снижения несущей способности земляного полотна из барханных песков.

6. Исследования показали, что при увеличении амплитуды колебаний увеличиваются коэффициенты относительного снижения прочностных характеристик барханных песков.

Список литературы

1. Прокудин И.В. Прочность и деформативность железнодорожного земляного полотна из глинистых грунтов, воспринимающих вибродинамических нагрузок: дис. ... д-ра техн.наук. Л.: ЛИИЖТ, 1982. 455 с.
2. Корнилов С.Н., Бабенцев Д.Ю., Довженко А.С. Проблемы эксплуатации железнодорожного транспорта ЗАО «ЛутЭК» // Горный информ.-аналит. бюл. № 8. М.: МГГУ, 2003. С.136–139.
3. Корнилов С.Н., Романюк А.И. Изменение конструкции железнодорожных путей ОАО «ММК» на основании из деревянных шпал с целью увеличения характеристик прочности и продления сроков эксплуатации // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования: материалы 71 межрегион. науч.-техн. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. Т.1. С.65–68.
4. Абдукамилов Ш.Ш. Исследование барханных песков в условиях трехосного напряженного состояния при воздействии вибродинамических нагрузок // Известия ПГУПС. Вып. 3. Санкт-Петербург, 2011. С. 107–114.
5. Абдукамилов Ш.Ш. Исследование колебательного процесса барханных песков, уложенных в железнодорожное земляное полотно // Известия Транссиба. Вып. 2(18). Омск, 2014. С. 75–86.
6. Гольдштейн М.Н. и др. Особенности динамических свойств грунтов при действии пульсирующей нагрузки на поверхности // Труды к VIII Международному конгрессу по механике грунтов и фундаментамостроению. М.: Стройиздат, 1973. С. 329–331.
7. Ершов В.А. Устойчивость песчаных насыпей в связи с колебаниями, вызываемыми железнодорожным и автомобильным транспортом // Труды ЛИСИ. №37. Л., 1962. С. 76–94.
8. Красников Н.Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения. Л.: Стройиздат, 1975. 240 с.
9. Колос А.Ф. Противодинамическая стабилизация железнодорожного полотна путем цементации грунтов основной площадки: дис. ... канд.техн.наук. СПб.: ПГУПС, 2000. 163 с.
10. Сипидин В.П., Сидоров Н.Н. Исследование грунтов в условиях трехосного сжатия. Ленинград, 1963. 90 с.
11. Савинов О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. М.: Стройиздат, 1979. 200 с.
12. ГОСТ 22733-2002. Грунты. Методы лабораторного определения максимальной плотности.

THE RESULTS OF AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF BARCHAN SANDS THAT FORM THE RAILWAY SUBGRADE

Kornilov Sergey Nikolayevich – D.Sc. (Eng.), Associate Professor, Head of the Industrial Transport Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Russia. E-mail: kornilov_sn@mail.ru.

Abdukamilov Shavkat Shukhratovich – Ph.D. (Eng.), Teaching Assistant, Tashkent Institute of Railway Engineering, Uzbekistan. E-mail: abdukamilov@mail.ru.

Abstract. This paper presents the results of laboratory research of changes in the strength characteristics of barchan sands under the action of vibrodynamic load. Quantitative values of the specific cohesion and the angle of internal friction of barchan sands under static and vibrodynamic loads are given. Dependencies to determine the strength characteristics of barchan sands considering vibrodynamic load in calculations of the railway subgrade strength are proposed.

Keywords: barchan sands, cohesion, angle of internal friction, vibrodynamic load, subgrade, method of conditional sudden destruction, triaxial stressed state, laboratory research.

References

1. Prokudin I.V. *Prochnost' i deformativnost' zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna iz glinistykh gruntov, vosprinimayushhikh vibrodinamicheskikh nagruzku* [Strength and deformability of the railway subgrade from clay soils taking vibrodynamic load]. Ph.D. dissertation. Leningrad: LIIZhT, 1982, 455 p.
2. Kornilov S.N., Babentsev D.Yu., Dovzhenok A.S. Problems of operation of railway transport of CJSC LuTEK. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten'* [Mining Informational and analytical bulletin]. Moscow: Moscow State Mining University, 2003, no. 8, pp.136-139.
3. Komilov S.N., Romanyuk A.I. Changing the design of railway tracks at OJSC MMK based on wooden sleepers to increase the strength and to extend the service life. *Aktual'nye problemy sovremennoj nauki, tekhniki i obrazovaniya: materialy 71 mezhtsebnogo nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya* [Current problems of modern science, technology and education: proceedings of the 71st interregional scientific and technical conference]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, vol. 1, pp. 65-68.
4. Abdukamilov Sh.Sh. The study of barchan sands in a triaxial stressed state under the influence of vibrodynamic loads. *Novosti-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya* [News of the Petersburg State Transport University], Saint Petersburg, 2011, vol. 3, pp. 107-114.
5. Abdukamilov Sh.Sh. The study of an oscillatory process of barchan sands, stacked in railway subgrade. *Zhurnal Transsiba zheleznodorozhnykh issledovanij* [Journal of Transsib Railway Studies], Omsk, 2014, vol. 2 (18), pp. 75-86.
6. Goldshtein M.N. and others. Features of dynamic properties of soils under the action of a pulsating load on the surface. *Trudy k VIII Mezhdunarodnomu kongressu po mekhanike gruntov i fundamentostroeniyu* [Proceedings for the 8th International Congress on Soil Mechanics and Foundation Engineering]. Moscow: Stroyizdat, 1973, pp. 329-331.
7. Yershov V.A. Stability of sand embankments due to fluctuations caused by railway and motor transport. *Trudy LISI* [Proceedings of LISI], no.37, Leningrad, 1962, pp. 76-94.
8. Krasnikov N.D. *Dinamicheskie svojstva gruntov i metody ikh opredeleniya* [Dynamic properties of soils and methods of their determination]. Leningrad: Stroyizdat, 1975, 240 p.
9. Kolos A.F. *Protivodinamicheskaya stabilizatsiya zheleznodorozhnogo zemlyanogo polotna putem tsementatsii gruntov osnovnoj ploshhadki* [Counter dynamic stabilization of railway subgrade by cementation of soils of the main site]. Ph.D. dissertation. St. Petersburg: PGUPS, 2000, 163 p.
10. Sipidin V.P., Sidorov N.N. *Soil analysis under triaxial compression*. Leningrad, 1963, 90 p.
11. Savinov O.A. *Issledovanie gruntov v usloviyakh trekhosnogo szhatiya* [Modern constructions of foundations under machines and their calculation]. Moscow: Stroyizdat, 1979, 200 p.
12. GOST 22733-2002. Soils. Laboratory methods for determining the maximum density.