

9. Vasilenko, V. Definition of the inspection criteria for personal protective equipment (for work at heights) on example of full body harnesses / V. Vasilenko, D. Korolchenko, P. Nam Thanh // MATEC Web of Conferences, Moscow, 14–16 ноября 2018 года. – Moscow: EDP Sciences, 2018. – P. 02042. – DOI 10.1051/mateconf/201825102042.

10. Harness Sizing and Strap Length Configurations / H. Hsiao, J. Whitestone, S. Taylor [et al.] // Human Factors. – 2009. – Vol. 51. – No 4. – P. 497-518. – DOI 10.1177/0018720809346320.

11. Василенко, В. В. Актуализация методики динамических испытаний амортизаторов как средств индивидуальной защиты от падения с высоты / В. В. Василенко // Строительство - формирование среды жизнедеятельности : Электронный ресурс: сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, Москва, 26–28 апреля 2017 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2017. – С. 439-441.

12. Prostakishin, D. Dynamic test method for full body harnesses exploited in cold climates / D. Prostakishin, Ph. Nam Thanh // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : BUILDINTECH BIT 2020. INNOVATIONS AND TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION, Belgorod, 08–09 октября 2020 года. – Belgorod: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012027. – DOI 10.1088/1757-899X/945/1/012027.

13. Карасев, В. К. Обслуживание и периодический осмотр СИЗ от падения с высоты / В. К. Карасев, А. С. Суханов // Безопасность и охрана труда. – 2016. – № 4(69). – С. 24-26.

14. Обследование и восстановление высотных объектов методом промышленного альпинизма / А. А. Ступаков, Г. Д. Леликов, П. А. Семенов, В. В. Василенко // Механизация строительства. – 2015. – № 2(848). – С. 48-52.

15. Техника безопасности при работе на высоте / О. В. Внукова, Ю. Р. Царькова, И. В. Царьков, И. Л. Волкова // Физика и современные технологии в АПК : Материалы XII Всероссийской (с международным участием) молодежной конференции молодых ученых, студентов и школьников, Орел, 16 декабря 2020 года / Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парухина. – Орел: Издательство Картуш, 2021. – С. 163-166.

© Г. Д. Леликов, К. В. Жердев, В. А. Антонова

Ссылка для цитирования:

Леликов Г. Д., Жердев К. В., Антонова В. А. Результаты экспериментальных исследований динамического испытания анкерной линии на кровельном покрытии // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 3 (41). С. 10–15.

УДК 692.1

DOI 10.52684/2312-3702-2022-41-3-15-22

**ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАНИЙ
НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ**

А. Н. Шебуняев

Шебуняев Александр Николаевич, аспирант, Московский государственный строительный университет, г. Москва, Российская Федерация, тел.: +7(977)946-11-93; e-mail: shebunyaev95@mail.ru

Изложен аналитический обзор основных публикаций по теме исследования влияния динамических воздействий на физико-механические свойства песчаных грунтов с целью оценки современного уровня проработки данного вопроса и выявления актуальных задач данной области механики грунтов. По результатам обзора установлено, что в рассматриваемой области механики грунтов проведен значительный объем исследований: установлены зависимости между статической составляющей напряжения, физическими свойствами песчаных грунтов и интенсивностью их виброуплотнения, введено понятие виброползучести (вибровязкости). Однако, несмотря на внушительную проработку данной области, в ней остался ряд нерешенных вопросов, и она является весьма актуальной для углубленного познания. В частности, для дальнейшего изучения авторам статьи видится перспективным экспериментально-теоретическое установление зависимости вязкости песчаных грунтов от их физико-механических свойств и условий нагружения при вибрационном воздействии.

Ключевые слова: динамическая нагрузка, виброуплотнение, виброползучесть, вибровязкость.

**REVIEW OF THE RESULTS OF STUDIES OF THE INFLUENCE OF VIBRATIONS
ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF SANDY SOILS**

A. N. Shebunyaev

Shebunyaev Alexander Nikolaevich, post-graduate student, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation, phone: +7(977)946-11-93; e-mail: shebunyaev95@mail.ru

The article presents an analytical review of the main publications on the topic of studying the influence of dynamic influences on the physico-mechanical properties of sandy soils in order to assess the current level of study of this issue and identify current problems in this field of soil mechanics. Based on the results of the review, it was found that a significant amount of research has been carried out in the field of soil mechanics under consideration: the dependencies between the static component of stress, the physical properties of sandy soils and the intensity of their vibration compaction were established, the concept of vibration creep (vibration viscosity) was introduced. However, despite the impressive elaboration of this area, there are a number of unresolved issues in it, and it is very relevant for in-depth knowledge. In particular, for further study, the authors of the article see a promising experimental and theoretical determination of the dependence of the viscosity of sandy soils on their physical and mechanical properties and loading conditions under vibration.

Keywords: *dynamic load, vibration compaction, vibration creep, vibration viscosity.*

Одной из важнейших фундаментальных работ, с которой началось отечественное изучение поведения грунтов под действием внешней нагрузки, является монография Н. М. Герсеванова «Основы динамики грунтовой массы» [9], первое издание которой было опубликовано в 1931 г. В данной работе грунт рассматривается как материал, работающий под нагрузкой и синтезирующий в своем поведении основы теорию упругости, теории сыпучих тел и теории фильтрации. По существу, монография Николая Михайловича положила начало такой дисциплине как механика грунтов в отечественной науке.

Первые значительные шаги по изучению влияния вибрационных воздействий на грунты в отечественной науке положены Д. Д. Барканом в 1930–1950-х годах. Практические исследования ученого были направлены на проблемы распространения волн от динамических источников, действия этих волн на сооружения, разработку соответствующих защитных мер, вибрационных методов погружения свай и шпунта, вибрационного метода бурения скважин. За долгие годы работы им был наработан широкий экспериментальный материал, который лег в основу первых норм по проектированию массивных фундаментов динамических машин, а также разработки вибрационных методов погружения свай и шпунта в грунт [2, 4, 5].

Его лабораторные опыты были направлены на исследование изменений свойств грунтов под действием динамических воздействий. В первую очередь Доминик Доминикович Баркан проводил изучение влияния вибраций на прочностные свойства грунтов в приборе одноплоскостного среза, в процессе проведения опытов образцу сообщались вибрационные воздействия различной величины. Также Доминик Доминикович проводил исследование влияния вибрации на снижение коэффициента пористости песчаных грунтов. В открытый сверху сосуд погружался образец песка, сосуду сообщались вибрации различной интенсивности. В 1948 г. им была опубликована исторически значимая монография «Динамика оснований и фундаментов» [2, 4, 5], которая в 1960 г. была переведена на английский язык и опубликована в зарубежных странах.

Несмотря на всю значимость и мощный научный толчок проведенных Д. Д. Барканом работ даже на международном уровне, они не учитывали одного важнейшего фактора. В исследованиях Доминик Доминикович не учитывал влияния напряженного состояния грунта на изменение его свойств под действием динамических воздействий. Дей-

ствительно, в зависимости от величины статического напряжения в образце грунта наблюдаемые показатели значительно меняются при прочих равных условиях. Данный пробел был учтен и восполнен последующими исследователями [30].

Не менее крупным отечественным представителем в изучении вопроса влияния вибрационных воздействий на свойства грунтов стал О. А. Савинов. Практические исследования Олега Александровича также отчасти были направлены на разработку новых методов погружения свай и шпунта в грунт с помощью вибрации, вибрационного метода бурения скважин. Также О. А. Савиновым были разработаны теория и методы вибрационного уплотнения грунтов, методы проектирования сейсмостойких плотин [23–35]. Им была разработана конструкция прибора для изучения влияния вибрационных воздействий на свойства грунтов [29], а позднее конструкция была усовершенствована его коллегой Л. А. Эйслером [43, 44]. Проведя колоссальный объем опытов на разработанном приборе, О. А. Савиновым были получены следующие важнейшие выводы о влиянии вибрационных воздействий на уплотнение песчаных грунтов:

1. Уплотнение несвязных грунтов возможно лишь в том случае, когда значение степени плотности D составляет меньше максимального значения для данного сложения D_0 ($D < D_0$). В противном случае ($D \geq D_0$) уплотнение грунта под действием вибрационных воздействий не происходит.

2. При отсутствии статической нагрузки ($p = 0$) уплотнение рыхлого несвязного грунта начинается при самых слабых вибрациях. При постепенном увеличении ускорений колебаний образцы получали уплотнение близкое к полному ($D = 1$). В сухих песках полное уплотнение достигается при ускорении в пределах $0,2 \dots 1,2g$, в водонасыщенных – $1 \dots 2g$, во влажных – свыше $2g$. При увеличении влажности песка от нуля до некоторого предела критическое ускорение резко возрастает, а затем при полном водонасыщении резко снижается [30. с. 108].

3. При действии статической нагрузки под действием малых ускорений, не превышающих некоторой величины ($w < w_{кр}$) уплотнение грунта не происходит. При превышении данного значения ($w \geq w_{кр}$) начинается уплотнение песка и происходит в узком интервале ($0,2 \dots 0,3g$). При дальнейшем увеличении ускорения степень плотности стабилизируется, и предельная величина степени плотности D_0 оказывается значительно меньше единицы.

4. При прочих равных значениях величина критического ускорения $w_{кр}$ тем больше, чем больше статическое давление, передаваемое на образец.

Аналогичные результаты исследований, касаемо влияния влажности и интенсивности динамического воздействия на уплотнение песчаных грунтов, были получены и опубликованы в этот период времени О. Я. Шехтер (1953 г.) [42], Н. Н. Масловым (1958 г.) [19], А. М. Ароновым (1959 г.) [1].

По данным О. Я. Шехтер для песчаных грунтов наиболее устойчивое состояние к вибрационному уплотнению наступает в диапазоне влажности 6...8 % [42].

В исследованиях А. М. Аронов изучал влияние взрывов на разжижение песчаных грунтов, и в работе [1] приводится «критическое» значение плотности песка ($D_0 = 0,6$), при достижении которого пески перестают уплотняться под действием взрывов, а более плотные ($D > 0,6$) – становятся более рыхлыми. Однако данное значение ($D_0 = 0,6$) является частным случаем, а максимальная структурная плотность зависит от гранулометрического состава. По данным О. А. Савинова для крупных песков максимальная структурная плотность изменяется в диапазоне $D_0 = 0,55 \dots 0,60$, для песков средней крупности – $D_0 = 0,58 \dots 0,60$, а для мелких песков – $D_0 = 0,80 \dots 0,82$ [29, 30].

Отдельное внимание изучению влияния статической составляющей нагрузки σ на характер уплотнения песков под действием ударно-вибрационных воздействий уделил П. Л. Иванов в своей работе 1978 г. [15]. Им получены экспериментальные зависимости, показывающие влияние величины статической составляющей нагрузки σ на интенсивность уплотнения песчаного грунта.

В частности, Павлом Леонидовичем Ивановым были сделаны следующие выводы касательно вибрационного уплотнения песков:

1. Возможность разрушения структуры несвязных грунтов, т. е. возникновение взаимных смещений частиц и нарушение их устойчивости, в основном определяется: интенсивностью динамических воздействий η , начальным статическим напряженным состоянием σ и плотностью грунта ε_0 .

2. Каждой величине статической нагрузки σ и начального коэффициента пористости ε_0 соответствует своя величина критической интенсивности динамического воздействия $\eta_{кр}$, при достижении которой начинается разрушение структуры и уплотнение грунта. Чем больше статическая нагрузка σ и чем меньше начальный коэффициент пористости ε_0 , тем выше порог начала виброуплотнения – больше величина критической интенсивности динамического воздействия $\eta_{кр}$.

3. При вибрационном воздействии существует определенное минимальное значение коэффициента пористости – предел уплотнения $\varepsilon_{пр}$, до которого происходит виброуплотнение грунта. Предел виброуплотнения увеличивается с ростом статической составляющей нагрузки σ . По результатам проведенных испытаний установлено, что в широком диапазоне ускорений (до $0,8g$) зависимость конечного значения коэффициента пористости ε_k , который достигается для определенного статического напряжения σ , от этого статического напряжения σ и динамической составляющей σ_d носит линейный характер и отлично описывается уравнением (1):

$$\varepsilon_k = \varepsilon_0 - a[\sigma(\varepsilon_0) - \sigma_d], \quad (1)$$

где ε_k – конечный коэффициент пористости при действующих в грунте напряжениях σ_d и ускорениях колебаний η ; ε_0 – начальный коэффициент пористости; a – коэффициент уплотнения [$\text{см}^2/\text{кгс}$]; $\sigma(\varepsilon_0)$ – напряжения, которые при начальном коэффициенте пористости ε_0 препятствуют разрушению структуры грунта динамическим воздействием интенсивностью η ; σ – напряжения, действующие в грунте.

Результаты экспериментов П. Л. Иванова [15] также показали, что уплотнение песчаных грунтов под действием вибрационных воздействий во времени носит экспоненциальный характер и математически удовлетворительно описывается уравнением (2):

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 - a[\sigma(\varepsilon_0) - \sigma](1 - e^{-\gamma_1 t}), \quad (2)$$

где ε_0 – начальный коэффициент пористости; a – коэффициент уплотнения [$\text{см}^2/\text{кгс}$]; $\sigma(\varepsilon_0)$ – напряжения, которые при начальном коэффициенте пористости ε_0 препятствуют разрушению структуры грунта динамическим воздействием интенсивностью η ; σ – напряжения, действующие в грунте; γ_1 – параметр скорости виброползучести [мин^{-1}].

В своей работе Hardin и Richart [51] получили зависимость модуля сдвига G от коэффициента пористости e при циклическом нагружении песчаных грунтов с малой амплитудой сдвиговой деформаций γ_a в виде функции $F(e)$ (3) [16]:

$$F(e) = \frac{(2,17-e)^2}{1+e}. \quad (3)$$

На основании данной зависимости и проведенных испытаний японский ученый Kokusho получил следующую зависимость модуля сдвига G от величины обжимающего напряжения σ'_0 и амплитуды деформаций γ_a (4) [16, 57]:

$$G_0 = A \cdot F(e) \cdot (\sigma'_0)^n, \quad (4)$$

где A – константа, зависящая от амплитуды деформаций γ_a и гранулометрического состава песчаного грунта (крупности и окатанности частиц); $F(e)$ – коэффициент, учитывающий коэффициента пористости e песка; n – константа, в большинстве случаев принимающая значение 0,5 для малых амплитуд сдвига и возрастающая по мере ее увеличения;

Исследованию влияния величины амплитуды угловых деформаций γ_a на модуль сдвига G посвящены работы Iwasaki, Tatsuoka и др. [54] и Kokusho [56], в которых испытывался «стандартный» японский песок «Тоуога», и более современные работы Builes, Garcia и др. [47]. До величины деформации 10^{-6} модуль сдвига остается практически постоянным и равным своему «статическому» значению G_0 . С ростом амплитуды деформации γ_a после 10 циклов нагрузки / разгрузки модуль сдвига значительно снижается и при значении деформации 5×10^{-3} принимает значение 1/10 от начального значения. Kokusho [50] также установил зависимость между уровнем угловой деформации γ_a и величиной коэффициента демпфирования D : коэффициент демпфирования D возрастает с ростом амплитуды угловой деформации γ_a и достигает $\sim 0,25$ при амплитуде 5×10^{-3} [16, 56]

По результатам испытаний отмечается, что при уровне деформаций более 10^{-4} модуль сдвига G и коэффициент демпфирования D для 2-го и для 10-го цикла существенно не отличаются ($\Delta < 10\%$), а после 10-го цикла изменение практически отсутствует. Также отмечается практически полное отсутствие влияния коэффициента пористости e как на изменение модуля сдвига G , так и на изменение коэффициента демпфирования D . Таким образом, с ростом амплитуды угловой деформации γ_a грунт становится «мягче»: грунт «слабее» сопротивляется сдвиговым деформациям и «сильнее» поглощает энергию колебаний [16, 56].

Японскими учеными Iwasaki, Tatsuoka и др. [54] и Kokusho [56] проведено также изучение влияния обжимающих напряжений σ'_0 на относительное значение модуля сдвига G/G_0 и коэффициента демпфирования D при различной амплитуде угловой деформации γ_a . В результате исследования также выведена зависимость для модуля сдвига вида $\gamma_a \sim (\sigma'_0)^{0,5}$, из которой следует, что интенсивность снижения относительного значения модуля сдвига G/G_0 увеличивается вместе с ростом амплитуды деформаций γ_a и снижении напряжений σ'_0 . Вместе с тем, коэффициент демпфирования возрастает при уменьшении обжимающих напряжений σ'_0 . Таким образом, с ростом обжимающих напряжений σ'_0 грунт становится

«жестче»: грунт «сильнее» сопротивляется сдвиговым деформациям и «слабее» поглощает энергию колебаний [16, 56].

Колоссальный объем исследований проведен японскими коллегами в области изучения разжижения водонасыщенного песка под действием динамических воздействий [16]. Поскольку механизм разжижения водонасыщенного песка заключается в нарушении контактных сил между частицами песка, то напряжение в скелете грунта σ_s снижается и стремится к нулю, а поровое давление u_w возрастает и стремится к полному значению напряжений σ_{tot} . Поэтому изучение механизма разжижения японскими коллегами проведено посредством наблюдения за поровым давлением u_w . В качестве циклической прочности служит величина циклических напряжений, при которой происходит 5%-я осевая деформация за 20 циклов, т. к. именно данное предельное количество циклов фиксируется реальными акселерограммами (в среднем от 10 до 20 циклов) [16, 56].

Более современные зарубежные работы Xiaobing, Qingming и др. [64], Suprunenko [62] посвящены углубленному изучению механизма разжижения водонасыщенных песков, предложены новые модели, описывающие процесс разжижения. Например, в публикации Bao, Sture [45] описана пластическая модель на основе теории нечетких множеств, которая учитывает дилатансию грунта. Статья Pan, Yang [60] предлагает для описания механизма разжижения водонасыщенного песка энергетический метод. В работе Pan, Chen и др. [59] изложено углубленное изучение поведения песчаного грунта в период виброразжижения с выделением четких стадий изменения прочности грунта. В статье Xiu, Wang и др. [65] рассмотрен механизм разжижения песка в условиях слоистого основания. В работе Kaуen, Moss и др. [55] обработан значительный объем данных мониторинга разжижения песчаных оснований при землетрясении (301 случай).

В актуальных иностранных работах по рассматриваемой тематике приводятся новые методы исследования динамических свойств грунтов. Например, Dief [50] описал способ масштабных лабораторных испытаний грунтов с использованием энергетического метода, Pak, Soudkhah и др. [58] привели результаты лабораторного масштабного испытания квадратного фундамента на песчаном основании. В своей работе Cox [49] предложен интересный метод полевого испытания динамических свойств грунтов с моделированием землетрясения тяжелыми установками.

Работы более прикладного плана представлены Tarawneh, Bodour [63], Neh [52], в которых

изучается улучшение свойств основания посредством виброуплотнения для последующего сопротивления уплотнению на этапе эксплуатации строительного объекта в условиях динамических воздействий. В труде Chang [48] исследуется влияние закрепления песков методом цементации на сопротивление виброуплотнению грунтового массива. В своей статье Zhang, Luan и др. [66] описывают влияние уплотнения песчаных грунтов динамической нагрузкой на сопротивление сдвигу.

Наряду с вибрационным уплотнением в несвязных грунтах под действием динамических воздействий также наблюдается и снижение прочности. На раннем этапе изучения этого вопроса ошибочно считалось, что под действием динамических воздействий происходит снижение исключительно истинного угла внутреннего трения за счет изменения физико-механических свойств грунта [15].

По результатам исследований, проведенных позднее П. Л. Ивановым [13–15], В. И. Кудрей [18] и Л. Р. Ставницером [38], установлено, что снижение прочности заключается в изменении НДС грунта, а не в изменении его физико-механических свойств – истинного угла внутреннего трения. В своих работах И. И. Блехман [6–8] и Г. Ю. Джанелидзе [8] вводят понятие эффективного угла внутреннего трения в противовес истинному углу внутреннего трения, т. е. оперирование таким понятием значительно нагляднее в прикладных задачах.

Ошибочность выводов ранних исследователей кроется в тривиальности лабораторных экспериментов и сужении перечня изучаемых влияющих факторов. В частности, ими не было учтено изменение НДС – от статической части нормальных напряжений σ_n отнимается динамическая составляющая $\Delta\sigma$, что в свою очередь приводит к снижению предельного сдвигового напряжения τ_{ult} по закону Кулона (5) [15]:

$$\tau_{ult} = (\sigma_n - \Delta\sigma) \cdot tg\varphi. \quad (5)$$

В своей работе П. Л. Иванов (1978 г.) [15, с. 21] приводит крайне категоричное суждение о том, что в результате вибрационного воздействия на несвязный грунт снижение прочности происходит только по причине изменения НДС грунта, описание которого приведено выше.

В работе В. А. Ершова и Се Дин И [12] установлено, что с увеличением ускорения колебаний сопротивление сдвигу, при прочих равных условиях, сначала сохраняет то же значение, что и при отсутствии колебаний, а затем при ускорениях, превышающих некоторое пороговое значение, постепенно снижается.

Говоря о снижении прочности, следует отметить явление динамического разжижения песчаных грунтов. В водонасыщенном песке вода оказывает взвешивающее действие на зерна грунта, ослабляя и без того ослабленные вибрацией контактные силы трения между частицами за счет снижения нормальной составляющей контактных сил. В таком случае силы внутреннего трения значительно снижаются или практически исчезают, что приводит такой грунт в состояние «тяжелой воды» [13, 24].

По результатам наблюдений О. А. Савинов в своей работе [30] отмечает, что даже при слабой интенсивности вибраций $\Delta\sigma$ и при действии сдвигающего усилия, не достигающего предельного значения τ_{ult} , все равно наступают дополнительные сдвиговые деформации. Как отмечает Олега Александровича, в краевых («классических») зонах пластических деформаций оснований достаточно сравнительно слабых вибраций, чтобы вызвать перемещение грунта, который начинает медленно вытекать из-под подошвы фундамента, что вызывает перераспределение напряжений в грунтовом массиве и соответственно – течение грунта от центра к краям подошвы. Такие деформации протекают с малой скоростью во время колебаний, но при длительном воздействии могут достигать значительных величин. Например, по результатам наблюдений Р. А. Ершова и А. А. Романова [11] в Ленинграде для зданий, расположенных в пределах ~30 м от оси автомобильных дорог, среднегодовая осадка составляла 0,3...2,2 мм/год. Основания наблюдаемых зданий находилось в допредельном состоянии, и динамические составляющие напряжений не приводили к наступлению состояния предельного равновесия.

Данное явление, заключающееся в снижении сил внутреннего трения в несвязном грунте под действием вибрации, названо «вибровязкостью» и установлено в 1948 г. Д. Д. Барканом В рамках данных исследований проведен ряд экспериментов на приборе, состоящем из емкости с песком, расположенной на виброплатформе, в которую вдавливаются шарик, при этом происходит фиксация интенсивности вибрации и скорости погружения шарика. В результате исследований Домиником Доминиковичем установлены следующие основные выводы [3, 46, с. 61–65]:

- 1) интенсивное проявление вязких свойств в сухом песке начинается при ускорениях от 1,5g;
- 2) величина, обратная вязкости – $1/\eta$, имеет линейную зависимость с интенсивностью колебаний – величиной виброускорения;
- 3) величина, обратная вязкости – $1/\eta$, имеет минимальное значение при влажности порядка 13 %

и возрастает по степенной функции с увеличением влажности. Следует отметить, что по данным О. А. Савинова [24, с. 108] при аналогичном значении влажности наблюдается максимальное критическое ускорение песчаного грунта.

Таким образом, снижение сопротивления грунтов сдвигу под действием вибрационных воздействий заключается не только в изменении НДС, но и физико-механических свойств грунта, о чем в своей работе [30] верно отмечает Олег Александрович Савинов. Влияние изменения физико-механических свойств оказывается весьма значительным при сильных вибрациях в водонасыщенных песчаных грунтах – сопротивление сдвигу практически отсутствует. В сухих песчаных грунтах и пластичных глинистых грунтах наблюдается менее значительное, но все же достаточно существенное снижение истинного угла внутреннего трения [30].

Следует отметить, что схема испытаний, используемая Д. Д. Барканом [3, 46], не лишена недостатка: как при исследовании уплотнения и снижения прочности песчаных грунтов при динамических воздействиях, не учтено напряженное состояние песчаного грунта. Как известно, сопротивление грунта сдвиговым деформациям зависит не только от механических свойств самого грунта, но и от его напряженного состояния. В результате исследований отмечается, что с глубиной погружения шарика в вибрирующую емкость с песком скорость погружения снижается при сохранении усилия проталкивания, что указывает на увеличение вязкости. Данный аспект представляется возможным доработать, если протаскивать шарик в емкости не вертикально, а горизонтально с сохранением обжимающей нагрузки. Такая конструкция прибора предложена автором в заявке на изобретение RU 2021 128 334 А.

Учеными из НИИОСП им. Н. М. Герсеванова и Ленинградского Промстройпроекта – В. А. Ильичевым, В. И. Керчманом, Б. И. Рубиным и В. М. Пятецким – на Днепропетровском ГОК проведен полевой крупномасштабный эксперимент, заключающийся в натурном наблюдении за колебаниями и осадками семи опытных фундаментов с различными размерами и давлением под подошвой, один из которых был фундаментом-источником колебаний [21, с. 147–151; 37, с. 1012–1015; 53]. В результате проведенного исследования установлен ключевой аспект в исследовании влияния параметров динамического нагружения фундаментов на их дополнительную осадку, заключающийся в следующем:

1) потеря виброустойчивости основания (т. е. развитие назатухающих осадок) наступает при определенном соотношении между статическим и динамическим напряжениями (6);

$$\sigma^* = \sigma_{st} + \alpha \cdot \sigma_{dyn} \quad \sigma^* < R \quad (6)$$

где σ_{st} – статическое давление под подошвой фундамента; σ_{dyn} – динамическое давление под подошвой фундамента; α – коэффициент зависимости между статическим и динамическим давлением, принимающий значение в рамках эксперимента $\alpha \approx 20$ (при других экспериментах получены значения $\alpha \approx 20 \dots 50$ [21, с. 152]); R – расчетное сопротивление грунта основания.

2) при равных статических давлениях на основание бóльшая скорость осадок наблюдается у фундаментов с бóльшим динамическим давлением;

3) при равных динамических давлениях на основание бóльшая скорость осадок наблюдается у фундаментов с бóльшим статическим давлением;

4) при равных статических и динамических давлениях под подошвой увеличение виброускорений не приводит к увеличению скорости осадки фундамента.

При участии ученых из НИИОСП им. Н. М. Герсеванова (В. А. Ильичева, В. И. Керчмана, В. Г. Таранова) и из ДИИТ им. М. И. Калинина (В. Я. Хаина) подготовлены «Рекомендации по проведению полевых испытаний виброустойчивости оснований турбоагрегатов» [22]. Согласно данным Рекомендациям [22] виброустойчивость основания считается обеспеченной при выполнении хотя бы одного из условий (7). При этом определенному значению среднего статического давления под подошвой фундамента P соответствует определенное значение среднего динамического давления под подошвой фундамента $P_{dyn,max}$, при котором возникает дополнительная осадка, и, наоборот, определенному значению среднего динамического давления под подошвой фундамента P_{dyn} соответствует определенное значение среднего статического давления под подошвой фундамента P_{max} , при котором возникает дополнительная осадка.

$$P \leq 0,8 \cdot P_{max} \quad P_{dyn} \leq 0,8 \cdot P_{dyn,max} \quad (7)$$

Нормативный подход к учету явления виброползучести заключается в снижении модуля деформации введением коэффициента k_e , имеющего в знаменателе коэффициент λ , учитывающий отношение расчетных дополнительной и статической осадок фундамента (8) [22]. Дополнительная осадка за счет виброползучести получается умножением коэффициента виброползучести D на время действия вибрации постоянной интенсивности t . При этом коэффициент виброползучести D является экспериментальной величиной, получаемой в результате полевых штамповых испытаний при определенной интенсивности вибраций, статической и динамической составляющих нагрузки.

$$E_{об} = E \cdot k_e = \frac{E}{1 + \lambda} \quad \lambda = \frac{\sqrt{D_i \cdot t_n}}{s_{расч}} \quad D_i = \frac{s_i^2 - t_i}{t_i} \quad (8)$$

где E – статический модуль деформации; λ – коэффициент, учитывающий отношение расчетных дополнительной и статической осадок фундамента; D_i – коэффициент виброползучести; t_n – время межремонтного периода фундаментов турбоагрегата; $s_{расч}$ – среднее значение статической осадки фундамента; s_i и t_i – значения осадки и времени в начале и в конце каждой ступени i динамического нагружения фундамента.

Следует отметить, что современные нормативные технические документы (п. 6.14.4 СП 22.13330.2016 [36]) ссылаются на вышеуказанные Рекомендации [22], а в п.6.6.6 ГОСТ Р 56353-2015 [10] приводится аналогичная формула (9).

$$E_{red} = \frac{E}{1 + \frac{E \cdot \varepsilon_d}{\beta \cdot \sigma_z}} \quad (9)$$

Проявление осадок фундаментов s_{dyn} , обусловленных виброползучестью грунтов основания, принято выражать через уравнение (10) [22]:

$$s_{dyn} = \sqrt{D \cdot t} \quad (10)$$

где D – коэффициент виброползучести; t – время динамического воздействия.

Возвращаясь к современным отечественным работам, следует отметить публикации З. Г. Тер-Мартirosяна, А. З. Тер-Мартirosяна и Е. С. Соболева, в которых изложены результаты трехосных динамических испытаний песчаного грунта при различной частоте с вычислением вязкости η , при этом более

высокой частоте вибрации f соответствовало более низкое значение вязкости [39, 41].

Выводы

По результатам проведенного обзора отечественной и зарубежной научно-технической литературы сделаны следующие основные выводы:

1. Экспериментально-теоретическое исследование поведения грунта при динамических воздействиях и распространение колебаний в грунтовом массиве является весьма актуальной задачей современной механики грунтов и геотехники.

2. Несмотря на внушительный объем работ в сфере исследования влияния динамических воздействий на деформирование песчаных грунтов, многие вопросы данной области механики грунтов остаются нерешенными. В том числе, но не ограничиваясь, к таким неизученным аспектам относится углубленное теоретическое обоснование ранее экспериментально установленных зависимостей влияния различных факторов (статическое напряжение $\sigma_{ст}$, степень плотности D , влажность w , крупность и однородность) на виброуплотнение и снижение прочности с возможностью прогнозирования поведения песчаных грунтов при динамических воздействиях, а также влияние различных параметров грунта и НДС на вязкость песчаного грунта в условиях динамического нагружения.

3. Весьма актуальной целью дальнейших исследований можно назначить установление зависимости влияния механических параметров грунта и его напряженного состояния на интенсивность виброползучести.

Список литературы

- Бахолдин Б.В. Методика расчета несущей способности свай по результатам динамических испытаний. // Основание фундаменты и подземные сооружения. Труды НИИоснований, вып.60. – М.: Стройиздат, 1975. – С.40-48.
- Васильевский Ю.И. Динамика погружения железобетонных свай. // Динамические расчеты, воднотранспортных сооружений. Труды координационных совещаний по гидротехнике, вып. 66. – Л.: Энергия, 1971. – С. 47-51.
- Герсеванов Н.М. Теория продольного удара с применением к определению сопротивления свай. Собрание сочинений, т. I. – М.: Стройвоениздат, 1948.
- Иванов П.Л. Грунты и основания гидротехнических сооружений. Механика грунтов: Учеб. для гидротехн. спец. вузов. – 2-е изд., переаб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 447 с.; ил.
- Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях / пер. с англ. под ред. А.Б. Фадеева, М.Б. Лисюка. СПб.: Изд-во НПО «Геореконструкция-Фундаментпроект», 2006. – 384 с.
- Красников Н.Д. Динамические свойства грунтов и методы их определения. Л.: Стройиздат, 1970 – с.240.
- Курдюк В.И. О сопротивлении сдвигу грунтов при динамических воздействиях. – Труды координационных совещаний по гидротехнике. Л., Энергия, 1973, вып.87, с.32-35.
- Курдюк А.Ю., Дисьяев Д.П. Определение несущей способности свайных фундаментов под авторынок // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2014. №4 (10). – С.11-15.
- Курдюк А.Ю., Устюгов С.В., Дисьяев Д.П. Анализ различных методик по определению несущей способности свайных фундаментов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2017. №4 (22). – С.19-23.
- Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел: Т.2 / А. Надаи; Пер. с англ. В. И. Розенблум и др.; Под ред. Г.С. Шапира. – М.: Мир, 1969. – 863 с.
- Патент № RU 2 578 514 С1 Российская Федерация, МПК G01N 11/10 (2006.01). Грунтовый вискозиметр: №2014151525/28: заявл. 19.12.2014; опубл. 27.03.2016/ Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Мирный А.Ю., Соболев Е.С.; заявитель ФГБОУ ВПО «МГСУ». – 7 с.: ил. – Текст: непосредственный.
- Пятецкий В.М. Современные фундаменты машин и их автоматизированное проектирование / В.М. Пятецкий, Б.К. Александров, О.А. Савинов. – М.: Стройиздат, 1993. – 415 с.: ил.
- Савинов О.А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет. Изд. 2-е, перераб. и доп. Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1979. – 200 с., ил.



14. Соляник-Красса К.В. Осесимметричная задача теории упругости. – М.: Стройиздат, 1987. – 336 с.: ил.
15. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения: издание второе, дополненное и переработанное / Под общей ред. Ильичева В.А. и Мангушева Р.А. – М.: Изд-во АСВ, – 2016, – 1040 с.
16. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З. Механика грунтов в высотном строительстве с развитой подземной частью: Учебное пособие. – М.: Издательство АСВ, 2020. – 946 с.
17. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Мирный А.Ю., Соболев Е.С. Грунтовый вискозиметр // Журнал «ГеоТехника», 5/2016, – С.4-9.

© З. Г. Тер-Мартirosян, А. Н. Шебуняев

Ссылка для цитирования:

Тер-Мартirosян З. Г., Шебуняев А. Н. Перемещение длинного стержня сквозь песчаный образец под действием динамической нагрузки // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГАОУ АО ВО «АГАСУ», 2022. № 3 (41). С. 15–22.

УДК 625.7.8

DOI 10.52684/2312-3702-2022-41-3-22-27

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ УПЛОТНЯЮЩИХ МАШИН
ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ
С УЧЕТОМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СЛОЕВ**

Ш. В. Бузиков, М. В. Мотовилова

Бузиков Шамиль Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства, Вятский государственный технический университет, г. Киров, Российская Федерация, тел. +7 905-870-93-56; e-mail: shamivb@mail.ru;

Мотовилова Марина Владимировна, заведующий лабораторией кафедры технологии машиностроения, Вятский государственный технический университет, г. Киров, Российская Федерация, тел. +7 922-917-48-74; e-mail: marina_mtd@mail.ru

Рассмотрены основные проблемы, связанные с эксплуатацией асфальтобетонных покрытий, их износом от колес транспортных средств с увеличением интенсивности дорожного движения. Поставлена задача повышения прочностных показателей дорожных покрытий из горячих асфальтобетонных смесей, с учетом технологических возможностей современных уплотняющих машин. Для достижения поставленной цели рассмотрены факторы, влияющие на повышение эксплуатационных параметров дорожных покрытий. Представлена расчетная схема взаимодействия вальца катка и уплотняемого материала, а также функциональная зависимость состояния напряжения в зоне контакта. По результатам экспериментального исследования приведено рекомендуемое количество проходов катка по одному следу при формировании дорожного полотна. Сделан вывод о влиянии уплотнения горячих асфальтовых смесей в процессе формирования дорожного полотна различными вальцами дорожно-строительных машин.

Ключевые слова: асфальтобетонное покрытие, эксплуатационные показатели, уплотняемый материал, прочность, валец катка.

**APPLICATION EFFICIENCY STUDY COMPACTION MACHINES
WHEN FORMING ROAD SURFACES TAKING INTO ACCOUNT THE STRESS-STRAIN STATE
OF ASPHALT CONCRETE LAYERS**

Sh. V. Buzikov, M. V. Motovilova

Buzikov Shamil Viktorovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Production, Vyatka State Technical University, Kirov, Russian Federation, phone: +7 905-870-93-56; e-mail: shamivb@mail.ru;

Motovilova Marina Vladimirovna, Head of the Laboratory of the Department of Mechanical Engineering Technology, Vyatka State Technical University, Kirov, Russian Federation, phone: +7 922-917-48-74; e-mail: marina_mtd@mail.ru

The main problems related to the operation of asphalt concrete pavements, their wear from the wheels of vehicles with an increase in the intensity of road traffic are considered. The task is to increase the strength indicators of road surfaces made of hot asphalt concrete mixtures, taking into account the technological capabilities of modern sealing machines. To achieve this goal, the factors influencing the increase in the operational parameters of road surfaces are considered. The design scheme of the interaction of the roller roller and the compacted material, as well as the functional dependence of the voltage state in the contact zone is presented. According to the results of the experimental study, the recommended number of skating rink passes along one track during the formation of the roadway is given. The conclusion is formed about the influence of compaction of hot asphalt mixtures in the process of forming the roadway by various rollers of road construction machines.

Keywords: asphalt concrete pavement, operational indicators, compacted material, strength, roller roller.

Введение

Увеличение скорости движения транспорта, трафика и плотности самих транспортных потоков, свя-

занных с перевозкой грузов и пассажиров необратимо приводят к возрастанию различных видов нагрузок на автомобильные дороги. Воздействие циклических, динамических, знакопеременных