

КРАВЦОВ В.Н., СЕСЬКОВ В.Е., ЛАПАТИН П.В.

Научно-исследовательское Республиканское унитарное предприятие по строительству
"Институт БелНИИС"

г. Минск, Республика Беларусь

УДК 624.131.552.4

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕЛКОГО И СРЕДНЕГО ПЕСКОВ ПРИ СОВМЕСТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ НА НИХ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗОК

Ключевые слова: песок, испытания вибродинамические, динамические характеристики, осадка, защита фундамента от колебания грунта.

Наведено результати комплексних досліджень динамічних властивостей піску як основи підвалин при сумісному впливу на нього статичного та динамічного навантаження. Наведено спосіб захисту плитних підвалин від динамічних впливів.

Приведены результаты комплексных исследований динамических свойств песка, как основания фундаментов, при совместном воздействии на него статической и динамической нагрузок. Дан способ защиты плитного фундамента от динамических воздействий.

Results of comprehensive researches of dynamic properties of sand as the ground beds of slab foundations on the combined effect of static and dynamic loads are presented. Method of protection slab foundation against dynamic loads is described.

ПОСТАНОВКА И АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

В связи с возрастающей природной и техногенной геодинамической активностью земли вопросы, связанные с оценкой динамических свойств и устойчивости грунтов достаточно широко изучаются и освещаются в технической литературе [1-3 и др.]. Это актуально и для Республики Беларусь, т.к. согласно исследованиям

АН РБ [4] часть территории страны, включая столицу г. Минск, попадает в 7-ми бальную сейсмичную зону. Однако до недавнего времени вопросы, связанные с проектированием фундаментов в сейсмических районах, учитывающие грунтовые условия Белорусского региона, полностью отсутствовали в нормативной базе РБ. В связи с этим в РУП "Институт БелНИИС", по поручению МАиС РБ, проводятся комплексные исследования свойств геодинамически нагруженных грунтов РБ с целью разработки на их основе методов проектирования новых и защиты существующих сооружений, а также предложений по корректировке действующей нормативной базы и национальных приложений к Еврокоду 7 [5].

Исходя из указанной цели задачами работы являются:

- 1 - изучение степени влияния динамических воздействий на физико-механические характеристики и прочностные свойства различных типов грунтов (песчаных, глинистых) Республики Беларусь;
- 2 - установление безопасных уровней воздействия: скорости, амплитуды, частоты от динамических источников (природных, техногенных) на здания и сооружения;
- 3 - уточнение расчетных моделей грунтовой среды и методов расчета оснований фундаментов при совместном воздействии на них статической и динамической нагрузок.

В настоящей статье ниже приводятся отдельные результаты работы по 1-ой задаче выполняемых исследований, относящихся к пескам, как наиболее распространенных грунтов на территории РБ.

**МЕТОДИКА, РЕЗУЛЬТАТЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ**

Для решения задач по п. 1 (см. раздел 1) проведены лабораторные и натурные исследования песков мелких и средних (в т.ч. водонасыщенных) на совместное действие статической и динамической нагрузок (далее - "СДН") аналогичных для фундаментов средненагруженных сооружений, подверженных геодинамическим воздействиям (сейсмическим, техногенным) в условиях РБ.

Для исследования поведения песков, нагруженных СДН использовались стандартные: методика динамических испытаний; компрессионные, сдвиговые приборы, штампы и специальная установка (рис. 1), обеспечивающие моделирование процесса совместного статического и динамического нагружения, в т.ч. и с возможностью бокового расширения грунта в гильзах компрессионного, сдвигового приборов и стакане установки.

Установка для испытания образцов из песков на совместное действие СДН (рис. 1) состоит из лабораторного вибростолу (3), объединенного с нагрузочным рычажным устройством (7), обеспечивающих требуемый уровень (диапазон) динамических и статических воздействий. Приборы прикреплены к вибростолу, на который устанавливается прибор (4) с гильзой или стаканом установки с испытываемым образцом песка размерами: диаметр от 4 до 7 см, высота 5...10 см (размеры образца подобраны таким образом, чтобы максимально снизить влияние сил трения грунта о стенки металлической гильзы на результаты опытов). Вертикальная статическая нагрузка к образцу прикладывалась при помощи рычажного устройства с шагом плеч 1:7 ступенями со стабилизацией осадок до 0,01 мм, которые измеряются индикатором часового типа (6), а в полевых условиях – прогибомерами ПАО - 6, подсоединенных к штампу через подпружиненную проволоку, с точностью 0,01 мм. В полевых условиях вибрация штампа измерялась прибором (8) с использованием акселерометра 9.

Для определения виброуплотняемости (деформативности) и прочностных свойств образцов при динамических нагружениях, которые измерялись в соответствии с требованиями ГОСТ ИСО 8041-2006 [6], ГОСТ Р 56353-2015 [7] использовались калиброванные вибростол и аппаратура датской фирмы «Брюль и Кьер» с акселерометрами (вибродатчиками) типа 4332, которые являются прецизионными пьезоэлектрическими преобразователями с диапазоном измерения частот колебания до 3000 Гц и сигналов свыше 120 Дб. Сигнал от вибродатчиков регистрировался измерительным трактом и соответствующей аппаратурой фирмы «Брюль и Кьер» (рис. 1).

За критерий динамического воздействия (основной характеристикой колебательного процесса) в проводимых исследованиях приняты величины ускорений $a, м/с^2$, в активных диапазонах частот 16; 31,5; и 63 Гц, соответствующих доминирующим характеристикам колебаний от природных и техногенных геодинамических воздействий на сооружения в условиях РБ, т.к. ускорение в



Рис.1. Общий вид лабораторной установки: а - лабораторная установка в рабочем состоянии; б - портативный виброизмерительный прибор VB8 с акселерометром (9) для полевых испытаний грунта вибростампом; 1-усилитель сигнала; 2-генератор колебаний; 3-вибростол; 4-компрессионный или сдвиговой прибор; 5-грузы для рычажного прибора; 6-индикатор часового типа; 7-рычажное устройство для статического нагружения образца; 8-виброметр VB8; 9-акселерометр (датчик для измерения виброускорения штампа в т.ч. гильзы и стакана).

наименьшей степени зависит от изменений амплитуды и частоты колебаний.

Образцы для лабораторных испытаний формировались из мелкого и среднего песков, отобранных на строительных площадках г. Минска с характеристиками, установленными лабораторным и расчетным методами. Для песка мелкого они составляли: плотность скелета грунта $\rho_s=2,65 г/см^3$, плотность в сухом состоянии $\rho_d=1,41...1,73 г/см^3$, угол внутреннего трения $22...33^\circ$, коэффициент пористости от $e=0,62$ до $0,75$; сцепление с от 0 до $0,001$ МПа. Влажность в опытах варьировалась от 3% до 18%, неоднородность $U \leq 3$, $d_{60}=0,2$, с пылевато-глинистыми частицами диаметром $<0,1$ мм от 3 до 6%. Песок укладывался в гильзу-стакан установки с требуемой плотностью (пористостью) и степенью влажности (согласно матрицы испытаний) отсыпкой с высоты 2 см через воронку с уплотнением резиновым молотком. Масса образца контролировалась с точностью до $0,01$ г.

Программой предусматривалось два этапа исследований: лабораторные и полевые. На первом лабораторном этапе проведены опыты по изучению влияния влажности и динамических нагрузок на сдвиг и компрессионную сжимаемость исследуемого песка без возможности бокового расширения.

На втором этапе опыты по изучению влияния динамического нагружения песка выполнены на образцах как без, так и с наличием статической нагрузки интенсивностью 0,1; 0,2 и 0,3 МПа. Опытны выполнены с возможностью и без бокового расширения песка при приложении к нему вибростатической нагрузки.

Предельное значение объема выборки генеральной совокупности испытываемых опытных образцов для каждого исследуемого режима установлено из соображения, что максимально допустимая относительная ошибка оценки эмпирического среднего не должна превышать

шать $v=0.05$. На основании этого каждый из исследуемых режимов оценивался по результатам испытаний не менее чем трех образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Образцы песка на первом этапе лабораторных исследований формировались в гильзе-стакане с заданной плотностью (пористостью) от $\rho=1,41 \text{ г/см}^3$, с интервалом в $0,1 \text{ г/см}^3$, до $\rho=1,73 \text{ г/см}^3$, $e=0,8...0,5$. Каждому уровню плотности (пористости) соответствовала своя величина влажности от $16...18\%$ до $2...4\%$.

После изготовления образцов они крепились к вибростолу установки, динамически нагружались с интерва-

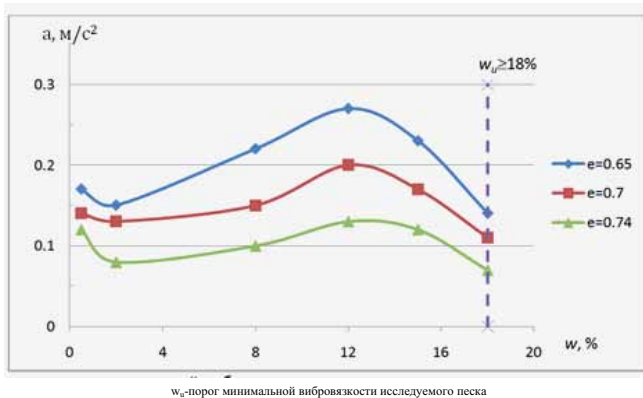


Рис.2. Зависимость динамической вязкости мелкого песка от влажности.

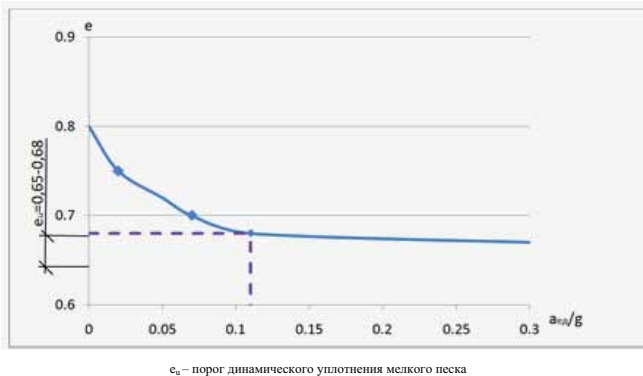


Рис.3. Виброкомпрессионная кривая исследуемого мелкого песка при влажности 18%.

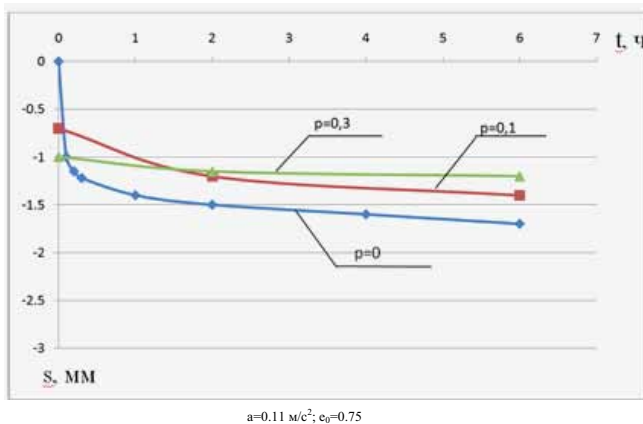


Рис.4. Деформирование водонасыщенного песка мелкого во времени при совместном воздействии на него статической и динамической нагрузок с возможностью бокового расширения.

лом ускорений от $a=0,02...0,35 \text{ м/с}^2$. Испытания проведены по стандартной методике ГОСТ 12248-2010 [8] без и с возможностью бокового расширения. Характерные результаты опытов по изучению влияния динамических нагрузок на малопрочный песок, предварительно пригруженный статической нагрузкой $\sigma=0,1-0,2-0,35 \text{ МПа}$ при пороговых значениях его пористости и влажности, а также в зависимости от времени $t - s=f(t)$, даны на рис. 2-4.

Лабораторные исследования показали, что динамические колебания песка при ускорениях превышающих некоторый предел, называемый критическим акр, изменяют его физико-механические свойства. Результаты лабораторных испытаний были проверены на 2-ом этапе исследований в полевых условиях.

Испытывались песчаные грунты методом ударного воздействия на штамп по методике Кудрявцева [9] – маловлажные, влажные и насыщенные водой со следующими физико-механическими характеристиками: $\rho=1,78 \text{ г/см}^3$; $\rho_s=2,7 \text{ г/см}^3$; $e=0,66$; $w=10...18\%$; $S_r=0,4...1,0$.

На штамп-фундамент или на расстоянии $0,5 \text{ м}$ от него (в зависимости от цели опыта) устанавливался функционирующий вибратор, для создания ускорений. Запись колебаний осуществлена виброметром (рис. 16).

Для каждой из рассматриваемых позиций проводилось не менее 6 замеров. Характерные результаты исследований неупрочненного и упрочненного песка мелкого и среднего даны на рис. 5 и 6. Анализ результатов лабораторных и полевых исследований показывает:

1. Статическое давление, вид песка и его характеристики (плотность, влажность) существенно влияют на величину критического ускорения. В частности, уменьшение площади штампа фундамента в 4 раза (с $2 \text{ до } 0,5 \text{ м}^2$) увеличивает критическое ускорение для песка в 2,0 раза.
2. При отсутствии статической пригрузки ($p=0$) уплотнение рыхлого песка начинается практически сразу после приложения динамической нагрузки, которое заканчивается после его полного уплотнения при ускорениях в пределах от $0,2 \text{ до } 1,0g$ в сухом грунте и $2g$ во влажном.
3. Для песка пригруженного статической нагрузкой зависимость степени плотности от динамической нагрузки имеет другой характер.

При ускорениях, не превышающих некоторого предела ("критическое" ускорение $a_{кр}$), образец нагруженный

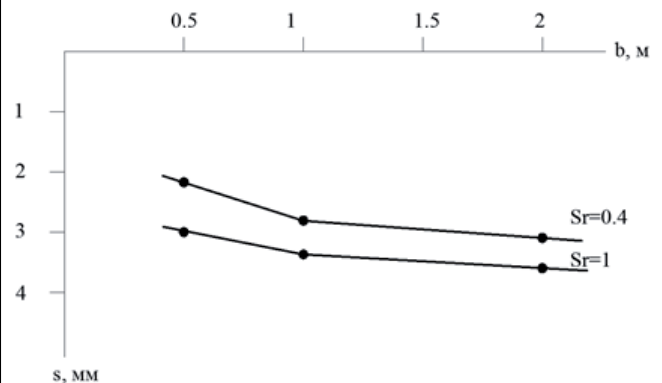


Рис.5. Графики зависимости осадки s основания штампа-фундамента из песка среднего ($\rho=1.78 \text{ г/см}^3$, $e=0,65$) динамически нагруженного в течение 30 мин от его ширины b и влажности грунта S_r .

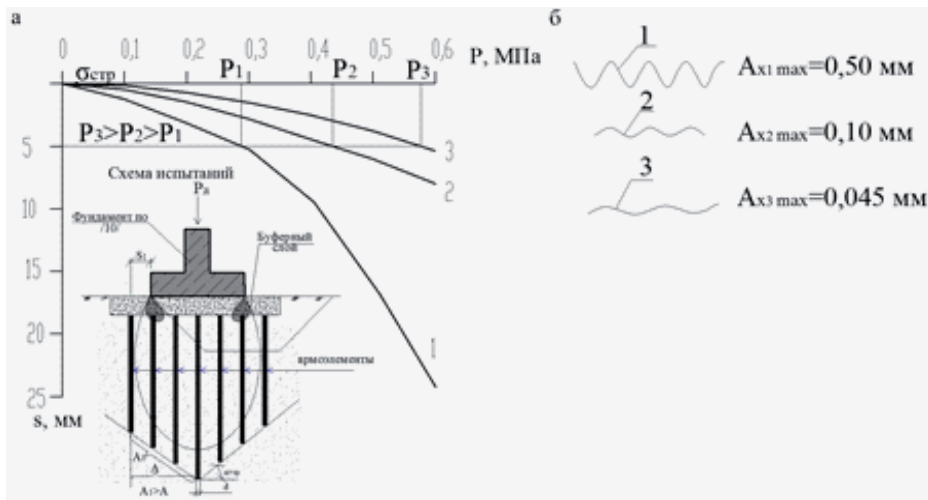


Рис.6. Характерные графики зависимости осадки s опытного штампа фундамента от нагрузки p (а) и амплитуд колебаний грунта основания фундамента от динамической нагрузки (б). 1 - график $s=f(p)$ и A_{\max} для неупрочненного песка мелкого ($e=0.65\dots0.7$, $w=6\%$); 2 - то же, для песка упрочненного вертикальным армированием сваями без выхода их за контур штампа; 3 - тоже, с выходом армоэлементов за его контур.

ВИВОДИ

1. В неводонасыщенных малопрочных песках при геодинамических нагрузках, эквивалентных сейсмичности до 6 баллов по шкале МСК осадки возникают только за счет уплотнения грунта (первая фаза, по Н.М. Герсеванову), а в водонасыщенных песках в т. ч. средней прочности – также за счет образования в толще основания сдвигов, обусловленных изменением напряженно деформированного состояния (НДС) грунта.

2. Для сильно нагруженных фундаментов ($0,7\dots0,9 P_{\max}$) в условиях второй фазы напряженного состояния грунта по Н.М. Герсеванову, в водонасыщенных динамически нагруженных песках возникают дополнительные (динамические) осадки, которые следует учитывать при проектировании оснований фундаментов.

Давление на такие основания рекомендуется снижать на 20...25% от допустимого $P_{\text{доп}}$ или упрочнять не менее чем на глубину, равную $2, 3b$ (где b - ширина фундамента), например способом вертикального армирования грунта, разработанным в РУП "Институт БелНИИС". Способ позволяет снизить динамическую нагрузку на здание в несколько раз, до требуемого безопасного уровня (рис. 6) [10].

статическими и динамическими нагрузками не дает осадки и не меняет плотности. Процесс уплотнения начинается после превышения ускорения $a_{\text{кр}}$, которое для исследуемых песков начинается в интервале $0,2\dots0,3g$.

При дальнейшем увеличении ускорения колебаний наступает стабилизация плотности.

4. Установлено, что под влиянием динамических нагрузок сопротивление грунтов сдвигу снижается, а деформационные и механические характеристики s и E - изменяются, практически при постоянном значении угла внутреннего трения ϕ . По результатам исследований предложено решение [10], позволяющее практически полностью ликвидировать неблагоприятные геодинамические воздействия на основания плитных фундаментов (рис. 6).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баркан Д.Д. Динамика оснований и фундаментов [Dynamics of ground bases and foundations] / Д.Д. Баркан. - М.: Стройвоенмориздат, 1948. - 411 с.
2. Ишихара К. Поведение грунтов при землетрясениях [Behavior of the grounds during earthquakes] / К. Ишихара. - СПб : НПО "Геореконструкция-фундамент проект", 2006. - 383с.
3. Сеськов В.Е. О затухании упругих волн в грунтах [About attenuation elastic waves in grounds] / В.Е. Сеськов, В.Н. Кравцов / Будівельні конструкції: збірник наукових праць. - Вип. 69. - Київ, НДІБК, 2008. - С.339-346.
4. Сероглазов Р.Р. Некоторые аспекты сейсмической безопасности при строительстве ответственных сооружений в Минске [Some aspects of the seismic safety of the construction of crucial facilities in Minsk] / Р.Р. Сероглазов, А.Г. Аронов, В.Н. Кравцов / Літасфера. - 2009. - №2(31). - С.119-125.
5. CEN 2004. Eurocode 7: Geotechnical design. Part 1: General rules. EN 1997-1: 2004 (E, F, G). November 2004. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
6. Вибрация. Воздействие вибрации на человека. Средства измерений [Human response to vibration - Measuring instrumentation]: ГОСТ ИСО 8041-2006. - Москва : Стандартинформ, 2007. - 125 с.
7. Грунты. Методы лабораторного определения динамических свойств дисперсных грунтов [Grounds. Laboratory methods for determining the dynamic properties of fine-grained grounds]: ГОСТ Р 56353-2015. - Москва : Стандартинформ, 2015. - 39 с.
8. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости [Grounds. Laboratory methods for determining the strength and strain]: ГОСТ 12248-2010. - Москва : Стандартинформ, 2011.-83 с.
9. Кудрявцев, И.А. Влияние вибрации на основания и сооружения [Effect of vibration on ground beds and structures] / И.А. Кудрявцев. - Гомель : БелГУТ, 1999. - 247 с.
10. Фундамент здания, возведенный на искусственно упрочненном слабом или малопрочном грунте и способ его возведения [The foundation of the building, erected on an artificially low or low-strength hardened ground and the method of its construction] : пат. 18688 Респ. Беларусь, МПК E02D27/12 / В.Е. Сеськов, В.Н. Кравцов, Н.С. Лобастов., В.П. Лебедик ; заявитель РУП «Институт «БелНИИС». - № а 20111166 ; заявл. 02.09.2011 ; опубл. 02.09.11 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собств. - 2011.