
УДК 624.131.55

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ДЕФОРМАЦИЮ
ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ**

Канд. техн. наук В. А. Александрович

**ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ДИНАМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ДЕФОРМАЦІЮ
ГРУНТОВОЇ ОСНОВИ**

Канд. техн. наук В. А. Александрович

**THE INFLUENCE OF DYNAMIC LOAD PARAMETERS ON DEFORMATION OF
FOUNDATION SOIL**

Cand. of techn. sciences V. A. Aleksandrovysh

Изложены результаты лотковых и полевых виброштамповых экспериментов. Анализируются особенности развития дополнительных осадок песчаных оснований фундаментов от воздействия динамических нагрузок. Установлены зависимости величины дополнительной осадки песчаных оснований фундаментов от параметров динамической нагрузки, которая подчиняется гармоническому закону, через соответствующие коэффициенты.

Ключевые слова: *виброползучесть, несвязный грунт, штамп, фундамент, осадка, статическая и динамическая нагрузка, гармонический закон.*

Викладено результати лоткових і польових віброштампових дослідів. Аналізуються особливості розвитку додаткових осідань піщаних основ фундаментів від дії динамічних навантажень. Встановлено залежності величин додаткового осідання піщаних основ фундаментів від параметрів динамічного навантаження, що підпорядковується гармонічному закону, через відповідні коефіцієнти.

Ключові слова: *віброповзучість, незв'язний грунт, штамп, фундамент, осідання, статичне та динамічне навантаження, гармонічний закон.*

The results of vibrostamp tests in the tray and in the field with soil have been considered. Progress with time of supplementary settlement of sandy foundation soils under dynamic loads is analyzed. Relationship of supplementary settlement of sandy foundation soils under harmonic dynamic loads depends on compliant coefficients have been estimated.

Keywords: *vibrocreep, non-cohesive soil, stamp, foundation, settlement, static and dynamic loading, harmonic law.*

Введение. Динамическая нагрузка, передаваемая от работающих машин через фундамент основанию, в ряде случаев способна вызвать длительную медленно затухающую осадку фундамента. Такое явление, именуемое виброползучестью, имеет место, в частности, если основание сложено песком средней крупности или мелким (водонасыщенным, средней и даже малой степени водонасыщения) различной плотности, или пластичной супесью, когда амплитуда вибрации превышает при действующем статическом давлении некоторую величину, называемую критической. Результаты измерения осадок и деформаций фундаментов на нескольких электростанциях, вызванных виброползучестью, свидетельствуют о том, что осадка фундаментов некоторых турбоагрегатов мощностью 300 МВт и более после включения агрегата в работу на номинальной мощности развивается вначале очень быстро, достигая за первый год 20-60 мм.

Такие, дополнительные к статическим, осадки виброползучести оснований, сложенных водонасыщенными мелкими и средней крупности песками, фундаментов машин с гармоническими динамическими нагрузками, частота вынужденных колебаний которых до 50 Гц, изучены недостаточно. Известны описания поведения грунта в момент его разжижения, тогда как для инженерной практики самое существенное значение имеют закономерности перехода песка в разжиженное состояние, в первую очередь, критические параметры вибрации, при которых начинается виброползучесть, а также совершенствование методики прогнозирования осадок таких оснований фундаментов машин.

Анализ последних исследований и публикаций. Проявление виброползучести крайне опасно для фундаментов, воспринимающих динамическую нагрузку от оборудования и соседних фундаментов здания, находящихся в зоне действия

вібрації, поскільки может привести к недопустимой осадке фундамента, расцентровке валопроводов и, в конечном счете, остановке всего технологического процесса (случай из практики Н. Л. Зоценко [1]). Также известны случаи: дополнительных осадок до 40 см фундаментов колонн, попавших в осадочные воронки фундаментов машин с динамическими нагрузками, что вызывало остановку работы мостовых кранов в цехах (примеры О. А. Савинова [2] и О. Р. Филиппова [3]); аварийных погружений самоходных виброратков Vibromax VM132, НАММ 3520 и ATLAS 1140, использовавшихся для послонного уплотнения водонасыщенных мелких и средней крупности песков при устройстве подушек, при работе в динамических режимах (Ю. Л. Винников [4]).

Определение целей и задачи исследования. Цель работы – установить зависимость увеличения деформативности грунтового основания в зависимости от параметров вынужденных колебаний.

Основная часть исследования. Согласно существующим на данный момент «Рекомендациям по проведению полевых испытаний виброустойчивости оснований фундаментов турбоагрегатов» [5] в качестве рабочего инструмента оценивания виброползучести грунта используют виброштамп небольших размеров, к которому прикладывают статическую и динамическую нагрузки. Согласно методике, после передачи на виброштамп эксплуатационного статического давления, выдержки до условной стабилизации и измерения осадки, к нему прикладывают динамическую нагрузку, при этом вертикальное динамическое давление σ_d (или приведенная амплитуда колебаний подошвы штампа a_{np}) увеличивают примерно равными ступенями до требуемого значения. По данным измерения статической \bar{S} и дополнительной S к ней осадок определяют основной параметр процесса – интенсивность

виброползучести α или коэффициент виброползучести D , используемый для численной оценки влияния вибрации на деформативные свойства основания. Определение D (или α) основано на зафиксированной экспериментально и подтверждаемой выводами теоретических исследований зависимости

$$S = (Dt)^n, \quad (1)$$

где t – время непрерывного действия стационарной динамической нагрузки;

$n \approx 0,5$ – показатель виброползучести.

На каждой ступени измеряют дополнительную осадку штампа $S_k(t)$ и длительность воздействия Δt_k , после чего рассчитывают коэффициент D_k , где k – номер ступени) по формуле

$$D_k = \frac{s_k^2 - s_{k-1}^2}{\Delta t_k}, \quad k=1, 2, 3 \dots m. \quad (2)$$

В результате для любого уровня динамического давления в интервале от 0 до σ_{dm} (или до a_{npm}) интерполяцией-экстраполяцией можно определить коэффициент виброползучести $D(\sigma_d)$ при заданном динамическом воздействии, а затем и текущую дополнительную осадку S . При неизменности статического давления увеличение осадки штампа от \bar{S} до $\bar{S} + S(t)$ эквивалентно снижению на момент времени t модуля деформации основания от значения E (полученного из статических испытаний) до значения

$$E_{общ}(t) = E \frac{\bar{S}}{\bar{S} + S(t)} = k_E E, \quad (3)$$

где k_E – коэффициент снижения статического модуля.

Следует заметить, что в силу установленного экспериментально факта независимости α (или D) от площади

опытного штампа описанная методика получила развитие при проведении полевых испытаний в дудках и скважинах [6, 7], а также – в вибростабилометрах [8] и лотках [9, 10, 11].

Проанализировано значительное количество данных испытаний виброползучести оснований фундаментов турбоагрегатов по методике [5], приведенных в работах [6-11]. В качестве основного инструмента для этого использованы методы математической статистики, в частности корреляционный и регрессионный анализы. Собрана информация о большинстве выполненных испытаний виброползучести грунтов, которая представлена в табл. 1 (частота колебаний 50 Гц) и табл. 2 (частота колебаний 25 Гц); опыты, имеющие индекс «штрих», проводились при амплитуде колебаний виброштампа $a \leq 5$ мкм, остальные – при $a \geq 10$ мкм.

Значения динамических давлений σ_d устанавливали с помощью известного

выражения $\sigma_d = ac_z$, где величины коэффициента упругого равномерного сжатия грунта; значения коэффициентов виброползучести и снижения модуля деформации k_E включены в таблицы без предварительной обработки, т. е. такими, как они приведены в соответствующих работах.

Из рассмотрения этих таблиц следует, что, с позиции математической статистики, все данные могут быть сведены к двум выборкам малого объема ($n=14, 15$) случайных величин, в которых грунтовые условия характеризуются различного вида водонасыщенными песками. Поскольку при подходе, изложенном в работе [5], основной характеристикой виброползучести является коэффициент D , корреляционный анализ производили с позиции оценки тесноты связи между величинами указанного коэффициента и статических и динамических контактных давлений; полученные результаты представлены в табл. 3.

Таблица 1

Опытные данные, частота колебаний 50 Гц

Номер опыта	Модуль деформации E , МПа	Среднее статическое давление по подошве штампа σ_d , МПа	Среднее динамическое давление по подошве штампа σ_d , кПа	Коэффициент виброползучести $D \cdot 10^{-3}$, мм ² /ч.	Коэффициент снижения модуля деформации k_E
1	28	0,2	1,06	2,5	0,7
2	19	0,2	0,72	10,1	0,6
3	30	0,21	1,80	0,74	1,0
4	90	0,21	6,45	7,8	0,55
5*	38	0,2	4,68	10,7	0,6
6*	38	0,25	5,32	6,0	0,6
7	22	0,2	0,73	16,3	0,76
8	29,5	0,2	1,34	0,9	0,69
9	29,5	0,25	1,06	4,5	0,69
10	29,5	0,2	1,99	17,0	0,69
5`	38	0,2	3,20	2,7	0,6

6`	38	0,25	2,76	22,5	0,6
8`	29,5	0,2	0,5	0	0,69
9`	29,5	0,25	0,36	0,05	0,69
10`	29,5	0,2	0,62	8,0	0,69

* испытания проводились в скважинах.

Таблица 2

Опытные данные, частота колебаний 25 Гц

Номер опыта	Модуль деформации E, МПа	Среднее статическое давление по подошве штампа σ_d , МПа	Среднее динамическое давление по подошве штампа σ_d , кПа	Коэффициент виброползучести $D \cdot 10^{-3}$, мм ² /ч.	Коэффициент снижения модуля деформации K_E
1	40	0,25	1,51	2,2	0,76
2	25	0,25	0,94	15,4	0,65
3	15	0,3	0,57	21,7	0,7
4*	23	0,3	1,26	-	0,56
5*	23	0,3	2,64	-	0,84
6*	37	0,3	3,04	-	0,79
7*	30	0,3	4,10	-	0,92
8*	23	0,3	1,38	-	0,92
9*	32	0,32	1,75	-	0,94
10*	34	0,32	1,86	-	0,73
1^	40	0,25	0,76	0	1,0
2^	25	0,25	0,47	0,54	0,9
3^	15	0,3	0,28	8,6	0,85
3^	20	0,22	1,42	9,5	0,77

* испытания проводились в шурфах-дудках и скважинах;

^ испытания проводились в лотке.

Таблица 3

Результаты корреляционного анализа

Виды зависимостей	Коэффициент корреляции	Оценка тесноты связи
$D=f(\sigma)$	$\frac{0,05}{0,45}$	<u>нет связи</u> слабая связь
$D=f(\sigma_d)$	$\frac{0,173}{-0,13}$	<u>нет связи</u> <u>нет связи</u>
$K_E=f(\sigma)$	$\frac{-0,13}{0,01}$	<u>нет связи</u> <u>нет связи</u>

$K_E = f(\sigma_d)$	$\frac{-0,47}{0,08}$	<u>слабая связь</u> нет связи
$K_E = f(D)$	$\frac{-0,28}{-0,78}$	<u>слабая связь</u> сильная связь

Примечание: $\frac{\text{числитель—при частоте колебаний } 50\text{Гц}}{\text{знаменатель—при частоте колебаний } 25\text{Гц}}$

Приведенные в таблице данные свидетельствуют об отсутствии тесной связи между давлениями по подошве фундамента и основными параметрами виброползучести, однако не рассмотренные зависимости в первую очередь представляют практический интерес, а зависимость вида $K_E = f(E)$. Выполнен в работе [6] корреляционный анализ указанной зависимости: для частот колебаний 25 и 50 Гц между K_E и E установлена слабая связь. Несмотря на это, получены уравнения регрессии, с помощью которых вычислены коэффициенты снижения модуля деформации по приведенным в таблицах значениям E . Получено: при частоте колебаний 25 Гц – $K_E = 0,81$; частоте колебаний 50 Гц – $K_E = 0,66$.

Выводы из исследования и перспективы, дальнейшее развитие в данном направлении. Учитывая, что попавшие в выборки опытные данные охватывают 80-90 % всех выполненных исследований виброустойчивости грунтовых оснований фундаментов турбоагрегатов, предлагаются указанные значения K_e для предварительного определения величины $E_{общ}$ общего модуля деформации с последующим уточнением поведения грунтового основания и закона, по которому будет развиваться его осадка во времени при действии динамической нагрузки по методике, разработанной в работе [12].

Список использованных источников

1. Зоценко, М. Л. Посилення основ фундаментів електродвигунів нахиленим армуванням за допомогою пневмопробійників [Текст] / М. Л. Зоценко, Ю. Л. Винников, П. М. Омельченко, М. Ф. Передерій // Будівельні конструкції: міжвід. наук.-техн. зб. – К.: НДІБК, 2001. Вип. 55. – С. 53-54.
2. Савинов, О. А. Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет [Текст] / О. А. Савинов. – Л.: Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1979. – 200 с.
3. Филиппов, О. Р. Исследование осадок фундаментов на песчаных основаниях при установившихся колебаниях [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.23.02 / О. Р. Филлипов. – М.: НИИОСП им. Н. М. Герсевича, 1978. – 117 с.
4. Винников, Ю. Л. Вплив вібраційного режиму котків на ущільнення малозв'язних розкритих порід [Текст] / Ю. Л. Винников [та ін.] // Зб. наук. праць (Галузеве машинобуд., буд-во). – Полтава: ПНТУ, 2009. – Вип. 25. – С. 40-49.
5. Рекомендации по проведению полевых испытаний виброустойчивости оснований фундаментов турбоагрегатов [Текст] / В. А. Ильичев, В. И. Керчман, В. Г. Таранов, В. Я. Хаин. – М.: НИИОСП – ДИИТ, 1986. – 30 с.
6. Таранов, В. Г. Способ приближенной оценки деформативности оснований фундаментов турбоагрегатов [Текст] / В. Г. Таранов // Интегрированные технологии и энергосбережение: науч.-акт. пр. журн. – Харьков: НТУУ ХПИ, 1999. – №3. – С. 25-33.

7. Taranov, V.G. Some problems of the founding of the powerful turbo-generator sets [Text] / V.G. Taranov, N.S. Shvetz., V.B. Shvetz, // Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Vols 1-5: Geotechnology in harmony with the global environment. – Osaka. – 2005. – P. 1567-1570.

8. Крыжановский, А. Л. Приближенный метод прогноза осадок виброползучести [Текст] / А. Л. Крыжановский, Р. О. Шеляпин, З. З. Чирков // Тезисы Всесоюзной конф. ДОФ-89. – Днепропетровск, 1989. – С. 57-62.

9. Александрович, В. А. Установка для изучения поведения грунтов при динамических воздействиях [Текст] / В. А. Александрович // Зб. наук. праць (галузеve машинобуд., буд-во). – Полтава: ПНТУ, 2010. – Вип. 28. – С. 14-16.

10. Aleksandrovych, V. A. Concerning the Vibrocreep Issue [Text] / V. A. Aleksandrovych // Proc. of 22-nd European Young Geotechnical Engineers Conf. – Sweden, Gothenburg: Chalmers university of technology. – 2012. – P. 173-178.

11. Александрович, В. А. Виброустойчивость песчаных оснований в диапазоне частот вынужденных колебаний 5 – 50 Гц / [Текст] В. А. Александрович, В. Г. Таранов // Зб. наук. праць (галузеve машинобуд., буд-во). – Полтава: ПНТУ, 2012. – Вип. 4 (34), Т. 1. – С. 24-29.

12. Александрович, В. А. Виброустойчивость песчаных оснований фундаментов машин с динамическими нагрузками, подчиняющимися гармоническому закону [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.23.02 / В. А. Александрович. – Полтава: ПНТУ, 2015. – 162 с.

Александрович Вадим Анатолійович, старший викладач кафедри механіки ґрунтів, фундаментів і інженерної геології Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. Тел.: (057) 707-31-12. E-mail: v.a.aleksandrovich@mail.ua.

Aleksandrovych Vadym Anatoliiovych, senior teacher of department of Soil Mechanics Foundations and Geology O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel.: (057)707-31-12. E-mail: v.a.aleksandrovich@mail.ua.

Стаття прийнята 12.12.2016 р.