

*В.А. Александрович, аспирант*

*В.Г. Таранов, д.т.н. профессор*

*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

## **ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ ПЕСЧАНЫХ ОСНОВАНИЙ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ 5 – 50 ГЦ**

*Описаны известные случаи появления слабозатухающих осадок фундаментов при работе динамического оборудования и методика их определения. Дан анализ проведенным исследованиям и сделан вывод о применимости.*

**Ключевые слова:** *виброползучесть, грунт, фундамент.*

*В.А. Александрович, аспирант*

*В.Г. Таранов, д.т.н. профессор*

*Харківська національна академія міського господарства*

## **ВИБРОСТІЙКІСТЬ ПІЩАНИХ ОСНОВ В ДІАПАЗОНІ ЧАСТОТ ВИМУШЕНИХ КОЛИВАНЬ 5 – 50 ГЦ**

*Описано відомі випадки появи слабозатухаючих осадок фундаментів при роботі динамічного обладнання і методика їх визначення. Подано аналіз проведеним дослідженням і зроблено висновок про застосовність.*

**Ключові слова:** *віброповзучість, грунт, фундамент.*

*V.A. Aleksandrovyich, PhD student*

*V.G. Taranov, Sc.D., professor*

*Kharkiv National Academy of Municipal Economy*

## **VIBROSTABILITY OF SANDY SOILS IN THE RANGE OF 5 – 50 Hz FORCED VIBRATIONS FREQUENCY**

*Weak decaying settlement of foundations under dynamic load and the technique of their forecasting have been analyzed in the paper. An analysis for conducted researches has been given and conclusion of applicability has been made.*

**Keywords:** *vibrocreep, soil, foundation.*

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими заданиями.** Предотвратить механические колебания, которые становятся причиной колебаний грунта, на практике почти невозможно, поскольку они обусловлены производственными процессами на предприятиях, технологии ведения строительных работ и другими динамическими явлениями. Оборудование с динамическими нагрузками является источником волн, распространяющихся в грунте и создающих влияние на близлежащие конструкции зданий и сооружений; объекты с оборудованием и аппаратурой, чувствительной к вибрациям, а также на обслуживающий персонал. Амплитуды колебаний могут превысить допустимые значения, установленные нормативными документами. При действии динамических нагрузок, возникающих при работе машин, могут происходить медленно-затухающие, достигающие значительной величины и зачастую неравномерные осадки их фундаментов.

**Анализ последних исследований и публикаций, в которых положено начало решению данной проблемы.** Согласно Н.М. Герсванову при действии на фундамент только статической нагрузки в состоянии грунта основания следует различать три фазы: фазу уплотнения, фазу образования начальных сдвигов и фазу разрушения. Имеющиеся данные наблюдений за объектами, подверженными динамическим нагрузкам, и экспериментальные данные свидетельствуют о том, что подобные три фазы можно

наблюдать и в тех случаях, когда фундамент подвергается совместному действию статической и динамической нагрузок [1 – 3].

Известен случай при работе кузнечного молота, когда динамическая нагрузка, передаваемая фундаментом, вызвала полное разрушение трехэтажного здания бытовых помещений кузнечного цеха. Амплитуда колебаний составляла около 1 мм, а частота колебаний – 15Гц. Поврежденное здание имело бутобетонный фундамент, передающий давление на грунт величиной 0,2 Мпа, и находилось на расстоянии 6 м от фундамента молота. Основание было сложено плотным мелкозернистым водонасыщенным песком. Разрушение здания, очевидно, было вызвано тем, что фундамент в различных его точках был подвержен различным величинам динамического давления по подошве. Вследствие чего образовались значительные неравномерные осадки, которые и привели к разрушению сначала самого фундамента, а затем и стен здания. Повреждения также получил каркас цеха. Неравномерные осадки фундаментов под колонны, находящиеся на разных расстояниях от источника колебаний, привели к нарушению узлов соединения элементов каркаса и образованию больших трещин в стенах.

Так же известны случаи со сборными железобетонными фундаментами турбоагрегатов, основанием для которых служили мелкозернистые и среднезернистые водонасыщенные пески. Характер осадки фундаментов турбоагрегатов до их пуска не отличался от осадок фундаментов других сооружений, построенных на той же площадке. После пуска агрегатов в эксплуатацию возникли значительные неравномерные осадки фундаментов турбоагрегатов, близлежащих колонн цеха, которые привели к расцентровке валопроводов. При этом амплитуда колебаний фундамента турбоагрегата не превышала 8 мкм. Причиной неравномерных осадок фундаментов турбоагрегатов стало воздействие вибраций на водонасыщенные песчаные грунты основания. Характерно то, что при остановке турбоагрегатов на ремонт осадки прекращаются.

Вибрационное воздействие от оборудования может вызвать осадку даже свайных фундаментов. Имеются сведения о неравномерной осадке фундаментов турбоагрегатов и фундаментов опор площадки конденсационных помещений. Основанием являются мелкозернистые водонасыщенные пески средней плотности. Амплитуда колебаний фундаментов турбоагрегатов не превышает 5 мкм, а фундаментов площадки – 3,5 мкм.

Известен случай неравномерной осадки фундаментов каркаса корпуса обогащения руды, в котором расположено много рудомольных мельниц и дробилок, передающих на основание значительные динамические нагрузки. Основанием фундаментов служат мелкозернистые и среднезернистые пески средней плотности с модулем деформации  $E=23\text{МПа}$ . Статическое давление по подошве фундаментов 0,4МПа. Максимальная расчетная осадка при данном статическом давлении не должна превышать 60 мм. Однако к настоящему времени она уже достигла отметки 300 мм и продолжает расти. Замеренные амплитуды колебаний колонн не превышали 20 мкм при частоте 5 – 7Гц.

Также имеются данные наблюдений за осадками нескольких десятков зданий в крупных городах, которые демонстрируют увеличение среднегодовой осадки зданий в несколько раз за последние 100 лет по мере увеличения вибрационного фона создаваемого движением транспорта. На это указывает тот факт, что рост среднегодовой осадки имеет место только для зданий, расположенных в радиусе ~30м от оси движения уличного транспорта и не наблюдается в других местах.

Как видно из вышеизложенного материала в большинстве случаев продолжительные во времени осадки фундаментов вследствие динамических нагрузок имеют место там, где основания сложены мелкозернистыми и пылеватыми водонасыщенными песчаными грунтами.

**Выделение не решенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья.** До последнего времени при рассмотрении вопроса возникновения длительной

слабозатухающей осадки фундамента при действии динамической нагрузки использовались два принципиальных подхода описанных в работах [4] и [5]. Само же явление осадки от динамической нагрузки получило название виброползучесть. Оба подхода используют принцип суперпозиции, заключающейся в суммировании осадки от статической нагрузки –  $S_{cm}$  и осадки виброползучести –  $S(t)$ .

$$S = S_{cm} + S(t) \quad (1)$$

Подход, описанный в работе [4], основывался на уравнении баланса энергии возбудителя колебаний поглощаемой основанием. Конечное уравнение, описывающее развитие осадки во времени, имеет вид

$$S(t) = (Dt)^{0,5}, \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент виброползучести.

Способ, описанный в работе [5], является первой попыткой применения теории наследственной ползучести при определении величины дополнительной осадки вследствие явления виброползучести. Уравнение, описывающее развитие осадки во времени, в данном случае имеет вид

$$S(t) = S_{cm} \frac{\beta}{\alpha} t^\alpha, \quad (3)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – некоторые коэффициенты.

Заложенное в данном подходе применение ядра Абеля в качестве ядра ползучести также приводит к степенному виду развития осадки во времени, как и в первом подходе. Поскольку  $S_{cm}$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  – постоянные, в итоге имеем выражение аналогичное (2) с той лишь разницей, что показатель степени –  $\alpha$  не задан изначально (0,5 в первом подходе), а определяется по результатам виброштамповых испытаний, как и остальные коэффициенты.

Однако, как показывают проведенные нами эксперименты, описание развития осадки виброползучести во времени при помощи только степенного закона не всегда является достаточно достоверным.

**Целью статьи** является исследование известных случаев появления слабозатухающих осадок фундаментов при работе динамического оборудования и методики их определения.

**Основной материал и результаты исследований.** Оба вышеописанных метода подразумевают проведение экспериментальных виброштамповых испытаний согласно методике, описанной в работе [6]. Согласно данной методике испытания могут проводиться по двум схемам. По первой – после передачи на виброштамп заданной величины статического давления, выдержки до условной стабилизации осадки  $S_{cm}$ , к нему ступенчато прикладывается динамическая нагрузка. По второй схеме опыты проводятся при различных величинах ступенчато-изменяющегося статического давления с одной фиксированной величиной амплитуды колебаний  $a$ . Продолжительность статических этапов определяется действующими нормами, а динамических – достижением критерия условной стабилизации – скорость осадки 0,02 мм/час, при длительности 4...8 часов.

Для проведения данного рода испытаний в ХНАГХ был построен крупномасштабный лоток и на его базе создана виброштамповая установка для проведения испытаний в лабораторных условиях [7].

Оператор эксперимента задает параметры колебаний и контролирует их неизменность, а также записывает получаемые данные в журнал эксперимента для последующей обработки.

Согласно нашим экспериментальным исследованиям имеет место поведение развития осадки во времени следующим образом:

1) на начальном этапе процесса характер развития хорошо аппроксимируется степенной функцией, что согласуется с результатами работ [4] и [5];

2) однако при достижении отметки времени  $t > 24 - 30$  часов – ее характер приобретает явно выраженный логарифмический характер, что хорошо согласуется с результатами фундаментальной работы [6]. При условии проведения эксперимента с неизменными величинами статического давления  $P_{cm}$ , амплитуды колебаний –  $a$  и частоты колебаний –  $f$ .

Принимая во внимание все вышеизложенное, было создано программное средство «Graph», предназначенное для анализа данных развития осадки виброползучести во времени, на основе экспериментальных данных, которое позволяет автоматически определять и учитывать изложенные выше нюансы поведения осадки во времени, а также определять заключительный динамический этап, параметры колебаний которого приводят к незатухающей осадке.

В качестве основных этапов анализа можно выделить:

- заполнение журнала эксперимента;
- построение графика развития осадки во времени;
- выделение отдельных этапов процесса осадки;
- определение оптимальной функции аппроксимации для каждого этапа осадки;
- определение параметров выбранной функции аппроксимации заданного этапа;
- построение аппроксимирующей кривой для каждого этапа;
- прогнозирование осадки на заданном промежутке времени;
- построение общего отчета о проведенном эксперименте.

В качестве примера проведения эксперимента и последующей обработки журнальных данных приведем результаты проведения исследований со следующими исходными данными:

- грунтовые условия: песок средней крупности; плотность  $\rho = 1,96 \text{ т/м}^3$ ; плотность скелета  $\rho_d = 1,62 \text{ т/м}^3$ ; влажность  $w = 0,21$ ; коэффициент пористости  $e = 0,64$ ; угол внутреннего трения  $\varphi = 33^\circ$ ; удельное сцепление  $c = 3 \text{ кПа}$ ; модуль деформации  $E = 38 \text{ МПа}$ ;
- статическая нагрузка  $P_{cm} = 0,25 \text{ МПа}$ ;
- частота колебаний  $f = 10 \text{ Гц}$ .

Цель исследования: прогноз осадки фундаментов машин.

Определить:

- амплитуду колебаний, при которой осадка станет незатухающей;
- уравнения развития осадки во времени для амплитуд промежуточных ступеней;
- получить прогноз величины осадки через заданный период времени.

Эксперимент проводился согласно рекомендациям [8] по первой схеме испытаний. Полученные данные заносились в журнал программы. По журнальным данным построены графики развития осадки во времени (см. рис 1; 2) и определены уравнения, описывающие процесс на каждом из этапов.

1.  $a = 5 \text{ мкм}$

$$\begin{cases} S = 1,58 t^{0,08} + 1,44, & t < 23 \text{ (часов)}; \\ S = 0,15 \ln(t) + 1,58, & t \geq 23 \text{ (часов)}. \end{cases} \quad (4)$$

Достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,990$

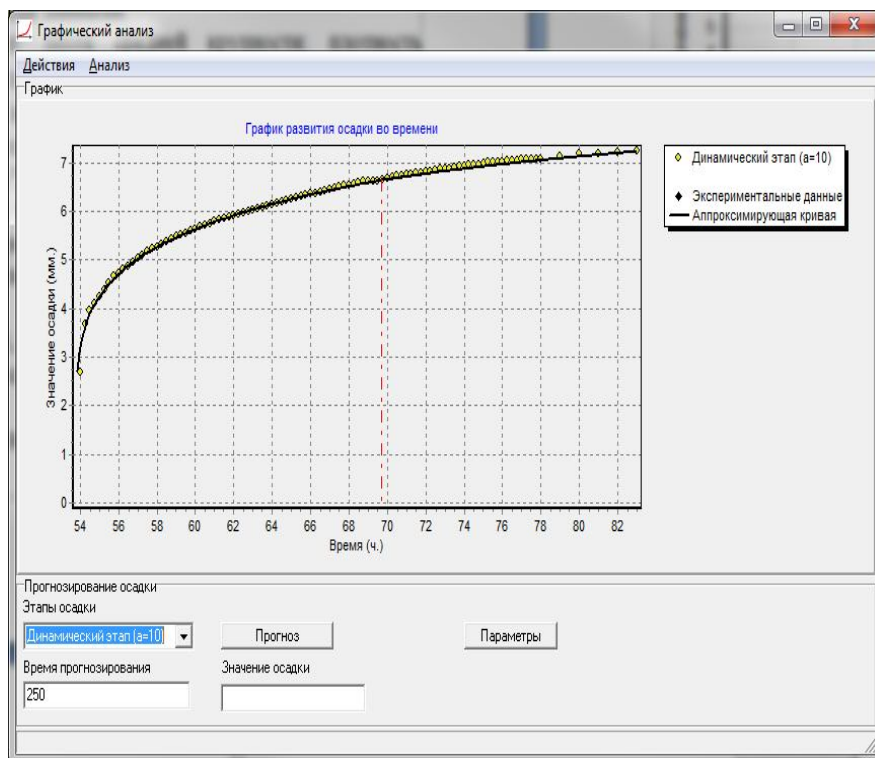
2.  $a = 10 \text{ мкм}$

$$\begin{cases} S = 4,08 t^{0,18} + 2,16, & t < 16 \text{ (часов)}; \\ S = 0,97 \ln(t) + 3,96, & t \geq 16 \text{ (часов)}. \end{cases} \quad (5)$$

Достоверность аппроксимации  $R^2 = 0,995$

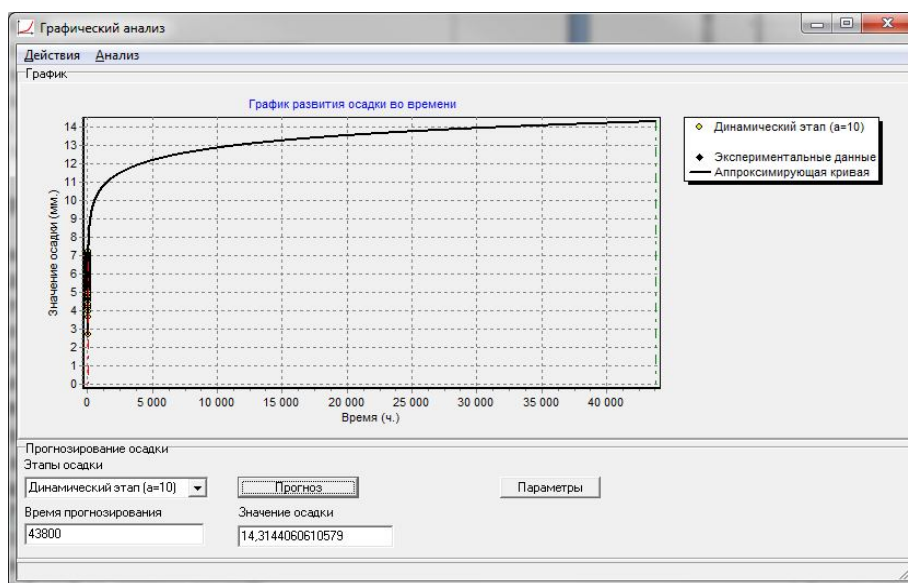
3.  $a = 15 \text{ мкм}$

$$S = 0,77 t + 8,48 \quad (6)$$



- ◆ опытные данные;
- аппроксимирующая кривая

Рисунок 1 – График осадки при  $a = 10$  мкм.



- ◆ опытные данные;
- аппроксимирующая кривая. Достоверность аппроксимации  $R^2=0,986$

Рисунок 2 – Прогноз осадки на период 5 лет, при  $a = 10$  мкм.

На третьей динамической ступени ( $a =$ ) программа определила аппроксимирующее уравнение как уравнение прямой (6); это означает, что при заданных параметрах осадка идет с постоянной скоростью – т.е. становится незатухающей. В случае, если машина, для которой выполнялось исследование, будет работать, создавая при этом вынужденные колебания штампа с амплитудой,  $a < 15$  мкм, тогда по полученным уравнениям

программой выполняется прогноз на необходимый временной интервал (статическая осадка также учитывается) и сравнивается с максимально допустимой величиной в техническом задании на проектирование фундаментов под данную машину. В случае же амплитуды  $a \geq 15$  мкм – необходимо увеличивать площадь проектируемого фундамента (уменьшать  $R_{ст}$ ) и повторять испытания.

**Выводы.** Приведенные в первом разделе примеры разрушений зданий и сооружений, а также нарушения работы оборудования свидетельствуют о важности рассматриваемого в статье вопроса.

Проведенное исследование позволяет говорить о применимости теории наследственной ползучести для определения величины осадки вследствие виброползучести. Эта теория и ранее предлагалась некоторыми исследователями для решения такого типа задач. Однако, как показали наши экспериментальные исследования, как минимум в ряде случаев этот подход требует существенных уточнений. Эти уточнения воплощены в жизнь при разработке программы “Graph” предназначенной для прогнозирования величины осадки на длительный период на основе сравнительно кратковременных виброштамповых испытаний.

Применимость разработанной нами методики подтверждается проведенной серией длительных экспериментов  $t > 100$  часов достоверность аппроксимации, при обработке данных которых составила  $R^2 = 0,98-0,99$ .

#### *Литература*

1. Савинов, О.А. *Современные конструкции фундаментов под машины и их расчет* / О.А. Савинов. – Ленинград, 1979. – 200 с.
2. Гришин, А. В. *Импульсное воздействие на бетонную плиту, лежащую на деформируемом основании* / А. В. Гришин // *Бетон и железобетон в Украине*. – 2001. – №2. – С. 13 – 15.
3. *Динамический расчет зданий и сооружений* / [Барштейн М.Ф., Ильичев В.А., Корнев Б.Г. и др.]; под ред. Б.Г. Корнева, И.М. Рабиновича. – [2-е изд., переаб. и доп.]. – М.: Стройиздат, 1984. – 303 с., ил. – (Справочник проектировщика).
4. Хаин, В.Я. *Теоретический анализ длительных осадок фундаментов при действии статической и динамической нагрузок* / В.Я. Хаин // *Динамика оснований и сооружений* / под. ред. Д.Д.Баркан [и др.]. – Ташкент, 1977. – С. 151 – 153.
5. Филлипов, О.Р. *Экспериментальные исследования осадки штампов на водонасыщенном песчаном грунте при вибрациях* / О.Р. Филлипов // *Динамика оснований и сооружений* / под. ред. Д.Д.Баркан [и др.]. – Ташкент, 1977. – С. 153 – 155.
6. Работнов, Ю.Н. *Элементы наследственной механики твердых тел* / Ю.Н. Работнов // М: Наука.– 1977. – 752 с.
7. Aleksandroych V.A. *Concerning the vibrocreep issue* / V.A. Aleksandroych // *Proceedings of 22-nd European Young Geotechnical Engineers Conference / edited by V. Swahn et al.* –Sweden, Gothenburg: Chalmers university of technology, 2012. –P. 173-178.
8. *Рекомендации по проведению полевых испытаний виброустойчивости оснований фундаментов турбоагрегатов* /Ильичев В.А., Керчман В.И., Таранов В.Г., Хаин В.Я. – М: НИИОСП – ДИИТ, 1986. – 30с.

*Надійшла до редакції 19.09.2012*  
©В.А. Александрович, В.Г. Таранов