

*На правах рукописи*



Шебуняев Александр Николаевич

Осадка и несущая способность оснований фундаментов  
с учетом виброползучести песчаных грунтов

Специальность 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ).

**Научный руководитель:** доктор технических наук, проректор  
**Тер-Мартиросян Армен Завенович**

**Официальные оппоненты:** **Пшеничкина Валерия Александровна**  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Волгоградский государственный технический  
университет»,  
заведующий кафедрой «Строительные  
конструкции, основания и надежность сооружений»

**Полунин Вячеслав Михайлович**  
кандидат технических наук,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет»,  
доцент кафедры геотехники

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тюменский индустриальный университет»

Защита состоится «13» декабря 2023 г. в 12:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.339.05 (Д 212.138.14), созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ) по адресу: 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, Зал Учёного Совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИУ МГСУ и на сайте <http://www.mgsu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



(подпись)

**Сидоров**  
**Виталий Валентинович**

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

На протяжении жизненного цикла промышленных и гражданских зданий и сооружений возникает необходимость оценки безопасности таких объектов при наличии динамических воздействий от различных источников. Такими источниками могут служить различные стационарные и передвижные машины и механизмы, движение дорожных и рельсовых транспортных средств, землетрясения и т.д.

На практике эксплуатации оснований и фундаментов в условиях динамических воздействий наблюдается широкий спектр ухудшения эксплуатационных показателей: от ухудшения эксплуатационных параметров оборудования, формируя перекосы и эксцентриситеты, и медленного многолетнего накопления осадок до сверхнормативных незатухающих осадок с критическим повреждением фундаментов и надземных конструкций таких сооружений. Терцаги К. и Пек Р. отмечали развитие неравномерных осадок установки для подачи угля, осадку фундамента турбогенератора величиной 30 см за год, осадку фундаментов надземной железной дороги величиной 35 см за 40 лет, осадку фундаментов зданий в области устроенных автомобильных дорог. Мониторинг за перемещениями фундаментов зданий в Ленинграде, расположенных в пределах тридцатиметровой от автомобильных дорог, осуществленный Р.А. Ершовым и А.А. Романовым, показал среднегодовую осадку порядка 0,3-2,2 мм/год. Филиппов Р.Д. отмечает случаи возникновения на одном заводе дополнительных осадок до 28 см в области работы штамповочного молота, на другом заводе – осадки фундаментов колонн до 40 см в области эксплуатации кузнечного молота. По наблюдениям Баркана Д.Д. воздействие кузнечного молота массой 4,5 т в производственном цехе вызвало дополнительные осадки соседнего административного кирпичного здания на территории завода, которые привели к его полному разрушению. В более современной работе Пятецкий В.М. приводит широкий перечень из 25-ти объектов, на которых наблюдались критические повреждения конструкций (трещины в несущих стенах, чрезмерные деформации каркаса, перекося подкрановых путей, нарушение целостности узлов соединения колонн и ферм и т.п.), отмечались осадки на расстоянии до 20-30 м от источника динамических воздействий (компрессоры, лесопильные рамы, дробилки, мельницы для измельчения руды и т.д.), а максимальные значения осадок доходят вплоть до 88 см, что также отмечается другими исследователями.

При решении подобного рода задач выделяют несколько областей проблематики: передача колебаний через грунтовый массив, влияние колебаний на несущую

способность грунтов и взаимодействие источника (или приемника) колебаний с грунтовым основанием.

При анализе обозримой литературной базы от нормативно-технической документации до научных публикаций прослеживаются пробелы в изучении динамики оснований, требующие более глубокого исследования и уточнения имеющихся результатов. Значительный объем работы проведен в области теоретического и экспериментального изучения колебаний конструкций на грунтовом основании и распространении вибраций от них, экспериментального исследования виброкомпрессионного уплотнения песчаных грунтов в части основных закономерностей влияния частоты колебаний, их амплитуды, пористости грунта, его влажности, величины статических напряжений и т.д., отмечено проявление виброползучести песков, даны экспериментальные зависимости коэффициента вязкости от интенсивности вибрации и напряженно-деформированного состояния грунта. Вместе с тем в инженерную практику не введены обобщающие модели, описывающие деформирование сыпучего грунта при различных уровнях статических и динамических напряжений, поэтому экспериментально-теоретическое исследование поведения песчаного грунта при циклическом нагружении является весьма актуальной задачей механики грунтов и геотехники.

#### **Степень разработанности темы исследования.**

Степень разработанности темы находится на высоком уровне, однако в предметной области имеются пробелы, не позволяющие всесторонне прогнозировать НДС песчаных оснований при динамическом нагружении. Отечественными и зарубежными учеными выполнен большой объем исследований в части виброуплотнения и снижения прочности песчаных грунтов при динамическом нагружении, влияния физико-механических свойств грунта и параметров нагружения на интенсивность деформаций, и не так много работ посвящено виброподвиговым деформациям. Наиболее близкие исследования ранее проводились Барканом Д.Д., Боголюбчиком В.С., Гольдштейном М.Н., Ивановым П.Л., Ильичевым В.А., Керчманом В.И., Красникова Н.Д., Полуниным В.М., Пшеничкиной В.А., Савиновым О.А., Соболевым Е.С., Тарановым В.Г., Тер-Мартиросяном А.З., Тер-Мартиросяном З.Г., Хаиным В.Я., Чирковым В.В., Шехтер О.Я., Эйслером Л.А., Chaney R.C., Dong-Ning D., Fang H.Y., Jianhong Y., Kafle B., Khosla V.K., Singh R.D., Wang K., Wang Z., Wuttke F., Zhang L.

Несмотря на большой объем проделанной работы в области исследования влияния динамического нагружения на деформирование несвязных грунтов, мно-

гие проблемы данной области геотехники остаются нерешенными. Как отмечал Вялов С.С., одной из проблем реологии является разработка такой модели грунта, с помощью которой можно было бы описать процесс деформирования во всем диапазоне нагрузок, включая предельные, и в которой сопротивление трению учитывалось бы как в допредельном, так и в предельном состояниях, причем прочностные и деформационные характеристики были бы связаны между собой. В настоящий момент отсутствует такая обобщенная модель деформирования песчаного грунта при динамическом нагружении, поэтому в настоящей работе предпринята попытка дополнить модель зависимостью коэффициента вязкости песчаного грунта в условиях динамического нагружения от действующих напряжений.

**Целью работы** является совершенствование методики количественной оценки деформаций песчаного основания зданий и сооружений в условиях воздействия динамических нагрузок с учетом виброползучести песчаного грунта.

#### **Задачи исследования**

1) Изучение и анализ современного состояния методов оценки напряженно-деформированного состояния грунтового основания в области источников динамического воздействий, распространение колебаний в грунтовой среде и их влияние на возникновение дополнительных деформаций в песчаном грунте;

2) Предложение конструкции прибора для измерения коэффициента вязкости песчаного грунта под действием вибрации, позволяющего контролировать и сохранять обжимающее давление в образце на всем пути деформирования образца с преобладанием сдвиговых деформаций в состоянии, близком к предельному;

3) Экспериментально-теоретическое уточнение зависимостей влияния напряженного состояния на интенсивность виброползучести песчаного грунта;

4) Решение задачи о перемещении штампа по поверхности грунта под действием боковой нагрузки при вертикальном нагружении статической и динамической нагрузкой с нарушением условия предельного равновесия;

5) Решение задачи о перемещении стержня сквозь песчаный образец под действием динамической нагрузки с обжимающим давлением с нарушением условия предельного равновесия;

6) Решение задачи о вибропогружении сваи в песчаное основание с учетом виброползучести песчаного грунта с изменяющимся коэффициентом вязкости в зависимости от интенсивности распространения колебаний в основании;

7) Решение задачи об осадке одиночного вибрирующего фундамента на пес-

чаном основании с учетом виброползучести песчаного грунта с изменяющимся коэффициентом вязкости в зависимости от интенсивности распространения колебаний в основании;

8) Решение задачи о дополнительной осадке фундамента окружающей застройке рядом с фундаментом, являющимся источником динамической нагрузки, с учетом виброползучести песчаного грунта с изменяющимся коэффициентом вязкости в зависимости от интенсивности распространения колебаний в основании.

**Объектом исследования** является песчаный грунтовый массив, подверженный динамическому воздействию, в котором проявляется виброползучесть.

**Предметом исследования** является количественная оценка напряженно-деформированное состояние песчаного основания во времени с учетом проявления виброползучести при динамическом воздействии.

**Научная новизна исследования** состоит в следующем:

1) предложена и запатентована конструкция грунтового динамического шарикового вискозиметра (патент № RU 2 775 356 C1), позволяющего проводить измерения с постоянством и контролем обжимающего давления при значительных сдвиговых деформациях с постоянным сопротивлением на всем пути перемещения шарика в образце песчаного грунта в состоянии, близком к предельному;

2) на предложенной конструкции динамического вискозиметра проведен ряд экспериментов, направленных на измерение коэффициента вязкости песчаного грунта при действии вибраций с различным уровнем статических касательных напряжений и средних напряжений с выявлением закономерностей;

3) решена задача о перемещении штампа по поверхности грунта под действием боковой нагрузки при вертикальном нагружении статической и динамической нагрузкой с нарушением условия предельного равновесия, при этом установлены количественные зависимости интенсивности продвижения штампа от условий нагружения;

4) решена задача о перемещении стержня сквозь песчаный образец с обжимающим давлением с нарушением условия предельного равновесия, при этом установлены количественные зависимости интенсивности продвижения стержня от условий нагружения и угла внутреннего трения грунта;

5) решена задача о вибропогружении свай в песчаное основание во времени с учетом виброползучести песчаного грунта;

6) решена задача об осадке одиночного вибрирующего фундамента на песчаном основании во времени с учетом виброползучести песчаного грунта;

7) решена задача о дополнительной осадке во времени фундамента окружающей застройки рядом с фундаментом-источником динамической нагрузки.

**Теоретическая значимость работы** заключается в проведении ряда экспериментов на запатентованной конструкции прибора с выявлением зависимостей влияния статического касательного напряжения и средних напряжений на величину коэффициента вязкости песчаного грунта при действии вибрации.

**Практическая значимость работы** заключается в предложении конструкции прибора для измерения коэффициента вязкости песчаного грунта при действии вибрации, решении задач с нарушением условий предельного равновесия о перемещении вибрирующего штампа под действием горизонтальной нагрузки и о перемещении стержня через песчаный образец под действием динамической нагрузки с боковым обжимающим напряжением, количественной оценке колебаний и перемещений при вибропогружении сваи в песчаное основание, осадки одиночного фундамента и дополнительной осадки фундамента окружающей застройки от колебаний фундамента-источника с учетом виброползучести песчаного грунта.

#### **Методология и методы исследования.**

В процессе проведения исследований применены эмпирические (измерение, описание, сравнение и лабораторный эксперимент) и теоретические (индуктивно-дедуктивный и гипотетический методы, формализация, идеализация, абстрагирование и моделирование) методы. Для решения задач, поставленных в настоящем исследовании, использованы частнонаучные экспериментальные и расчетно-аналитические методы. В частности, проведен ряд лабораторных экспериментов при различных условиях нагружения образца песчаного грунта с различными контролируемыми параметрами на основе зависимости Стокса с учетом поправок Ладенбурга. Результаты экспериментов обработаны, проанализированы и выявлены основные закономерности, которые также нашли теоретическое обоснование на уровне элементарных моделей. Полученные результаты экспериментально-теоретического исследования легли в основу построения реологической модели песчаного основания, подверженного действию динамических нагрузок, на основе уравнений прочности Мизеса-Боткина и пластической теории Генки с учетом дробно-линейной зависимости Тимошенко. При решении задач с нарушением условия предельного равновесия использована теория прочности Кулона.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Конструкция грунтового динамического шарикового вискозиметра;

2. Результаты экспериментально-теоретического исследования вязкости песчаного грунта при действии вибраций на предложенной конструкции динамического вискозиметра;

3. Выявленные зависимости влияния статических касательных напряжений и средних напряжений на величину коэффициент вязкости;

4. Постановка и решение о перемещении штампа по поверхности грунта под действием боковой нагрузки при вертикальном нагружении статической и динамической нагрузкой с нарушением условия предельного равновесия;

5. Постановка и решение о перемещении стержня под действием динамической нагрузки через песчаный цилиндр с обжимающим давлением с нарушением условия предельного равновесия;

6. Постановка и решение о вибропогружении сваи в песчаное основание с учетом виброползучести песчаного грунта с изменяющимся коэффициентом вязкости в зависимости от удаленности от сваи;

7. Постановка и решение об осадке одиночного вибрирующего фундамента на песчаном основании с учетом виброползучести песчаного грунта с изменяющимся коэффициентом вязкости в зависимости от удаленности от сваи;

8. Постановка и решение о дополнительной осадке фундамента окружающей застройки рядом с фундаментом, являющимся источником динамической нагрузки, с учетом виброползучести песчаного грунта с изменяющимся коэффициентом вязкости в зависимости от удаленности от фундамента-источника.

#### **Апробация результатов исследования.**

Результаты проведенных исследований доложены на XXXIX и L научно-практических конференциях «Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований», в XXVI Международном Салоне изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД», а также на XXVI научной Конференции «Construction the Formation of Living Environment» (FORM-2023).

**Личный вклад автора** заключается в обзоре современного состояния вопроса динамики песчаных грунтов, участия в разработке динамического вискозиметр, проведении экспериментального исследования и обработке результатов испытаний, формировании теоретического объяснения полученных результатов, решении практических задач с учетом нарушения условия предельного равновесия и реологических свойств песчаного грунта при действии вибрации.



### **Степень достоверности результатов исследования.**

Результаты исследования опираются непосредственно на эмпирические данные, полученные в результате экспериментального изучения деформирования песчаного грунта при действии динамической нагрузки в рамках настоящей работы, а также на результаты ранее выполненных фундаментальных и прикладных исследований с использованием современных моделей в области механики грунтов.

### **Публикации результатов работы.**

Полученные основные положения и результаты диссертационного исследования поэтапно полностью опубликованы в 8 научных работах, в том числе 4 статьи – в журналах, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», а также 2 статьи – в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и др.

В результате научной работы сформировано изобретение – Грунтовой динамический шариковый вискозиметр (Патент № RU 2 775 356 C1 Российская Федерация, МПК G01N 11/10 (2006.01). Грунтовой динамический шариковый вискозиметр: №2021128334: заявл. 28.09.2021: опубл. 29.06.2022/ Тер-Мартirosян З.Г., Шebуняев А.Н., Демин И.Е.; заявитель НИУ МГСУ). Изобретение принимало участие в XXVI Международном Салоне изобретений и инновационных технологий «АРХИМЕД» и решением Международного Жюри награждено золотой медалью.

### **Объем и структура работы.**

Настоящая диссертационная работа состоит из вводной части, трех глав основного содержания, заключения и библиографического списка. Диссертация изложена на 190 страницах и содержит 92 рисунка и 5 таблиц. Библиографический список содержит 297 наименования литературы, в том числе 115 иностранных позиций.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю на основном этапе подготовки диссертации – почетному академику РААСН, заслуженному деятелю науки РФ, лауреату Правительственной премии РФ в области науки и техники, профессору и доктору технических наук Завену Григорьевичу Тер-Мартirosяну – за сопровождение исследования обозначением цели, многократными консультациями и разборами результатов. Также автор выражает искреннюю признательность своему научному руководителю, который обеспечил завершение исследования – проректору НИУ МГСУ, доктору технических наук Армену Завеновичу Тер-Мартirosяну – за ценные практические советы по работе, за постоянную поддержку и неоценимый объем уделенного внимания.

## II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обозначена актуальность темы исследования, раскрыта степень ее разработанности, определена цель работы, поставлены задачи исследования, описана научная новизна, значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, и апробация результатов исследования.

**В первой главе** приводится обзор современного состояния вопроса. Отмечается, что значимый вклад в развитие исследуемого вопроса внесли следующие ученые: Баркан Д.Д., Боголюбчик В.С., Вознесенский Е.А., Гольдштейн М.Н., Иванов П.Л., Ильичев В.А., Керчман В.И., Красников Н.Д., Кудря В.И., Полунин В.М., Пшеничкина В.А., Пятецкий В.М., Рубин Б.И., Савинов О.А., Соболев Е.С., Ставницер Л.Р., Таранов В.Г., Тер-Мартirosян А.З., Тер-Мартirosян З.Г., Хаин В.Я., Чирков В.В., Шехтер О.Я., Эйслер Л.А., Chaney R.C., Fang H.Y., Ishihara K., Khosla V.K., Kokusho T., Lee K.L., Seed H.B., Singh R.D. и др. Анализ современного состояния вопроса показал необходимость дальнейшего совершенствования методики прогнозирования деформаций песчаных оснований при действии динамической нагрузки с учетом виброползучести.

**Вторая глава** посвящена экспериментальному исследованию проявления виброползучести. Приведено описание экспериментальной установки – грунтового динамического шарикового вискозиметра (рис.1). Проведена серия экспериментов с измерением коэффициента вязкости  $\eta$  с использованием различной нагрузки  $F$  и различного уровня статического обжимающего давления  $\sigma$  (рис.2).

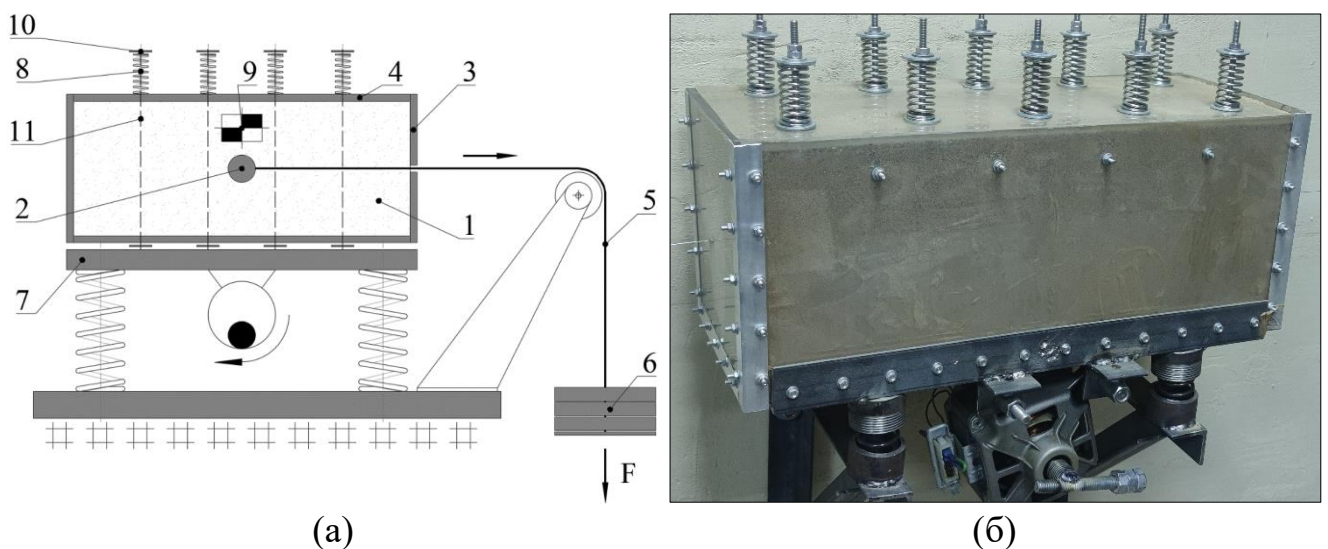


Рис.1. Схема устройства динамического вискозиметра шарикового типа (а):  
 1 – образец грунта; 2 – стальной шарик; 3 – рабочая камера; 4 – крышка;  
 5 – тонкий гладкий стальной трос; 6 – груз; 7 – виброплатформа; 8 – группа пружин; 9 – акселерометр; 10 – крепежные элементы; 11 – тяжи; фотография собранного грунтового динамического шарикового вискозиметра (б)

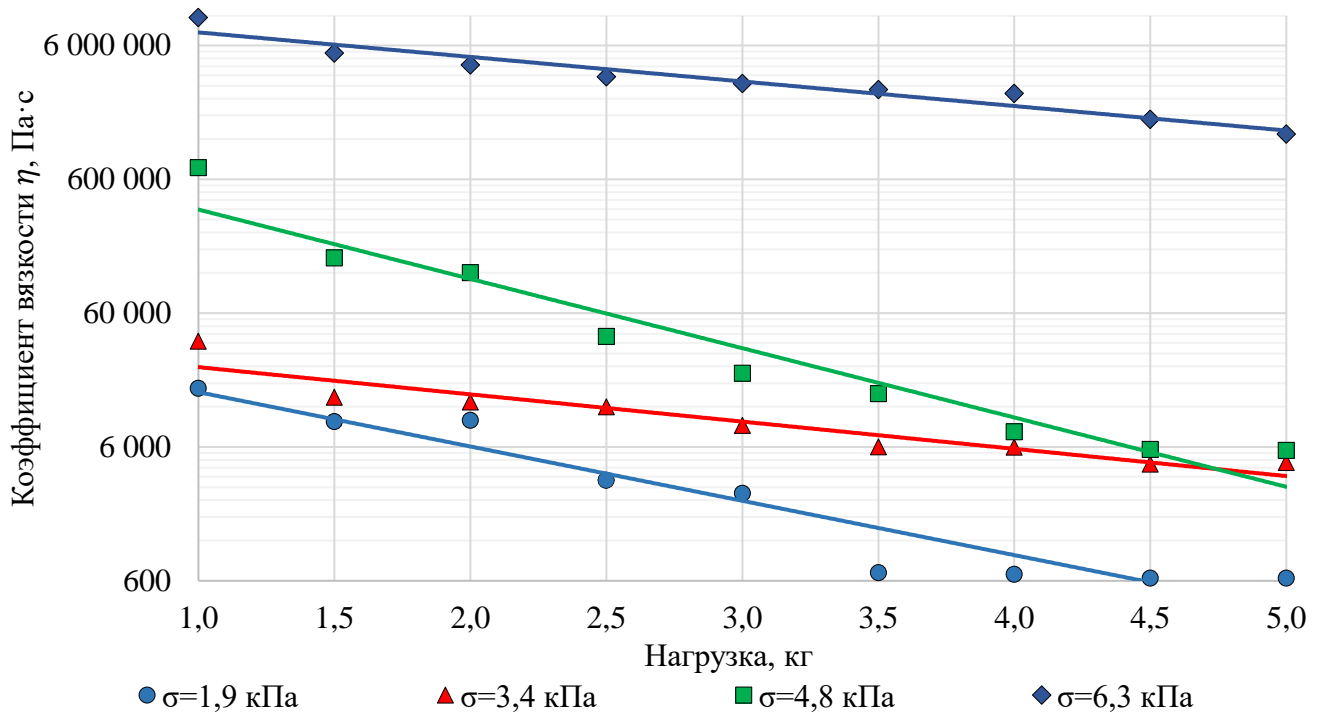


Рис.2. График зависимости коэффициента вязкости  $\eta$  от значения нагрузки  $F$  при различных значениях обжимающего давления  $\sigma$  (вертикальная шкала приведена в логарифмическом масштабе)

**В третьей главе** приводите решение прикладных задач фундаментостроения при динамических воздействиях на грунтовое основание.

**Перемещение вибрирующего штампа по горизонтальной поверхности грунта под действием боковой нагрузки.** Рассмотрена задача о перемещении штампа под действием боковой статической нагрузки при вертикальном воздействии динамической нагрузки (рис.3).

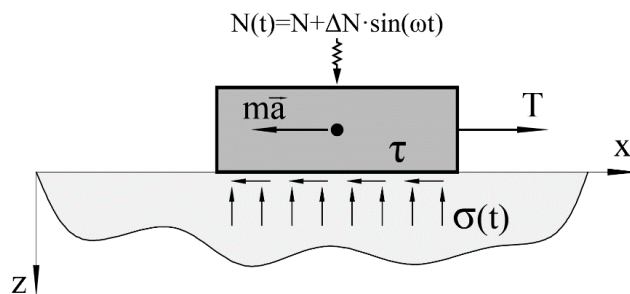


Рис.3. Иллюстрация задачи о перемещении вибрирующего штампа по горизонтальной поверхности грунта под действием боковой нагрузки

Решение задачи выполнено в программе Mathcad с построением графиков для различных значений амплитуды динамической составляющей нагрузки, сдвигающей силы и частоты. Для выполнения вычислений приняты следующие исходные данные:  $T = 8$  кН,  $N = 30$  кН,  $\Delta N = 20$  кН,  $\omega = 20$  рад/с,  $\varphi = 30^\circ$ ,  $m = 1$  т. Значения скорости  $v(t)$  и пройденного пути  $S(t)$  получены путем численного интегрирования. На рис.4 приведен график зависимости перемещения штампа  $S$  от времени  $t$  (развертка по времени 300 н соответствует 3,0 сек.).

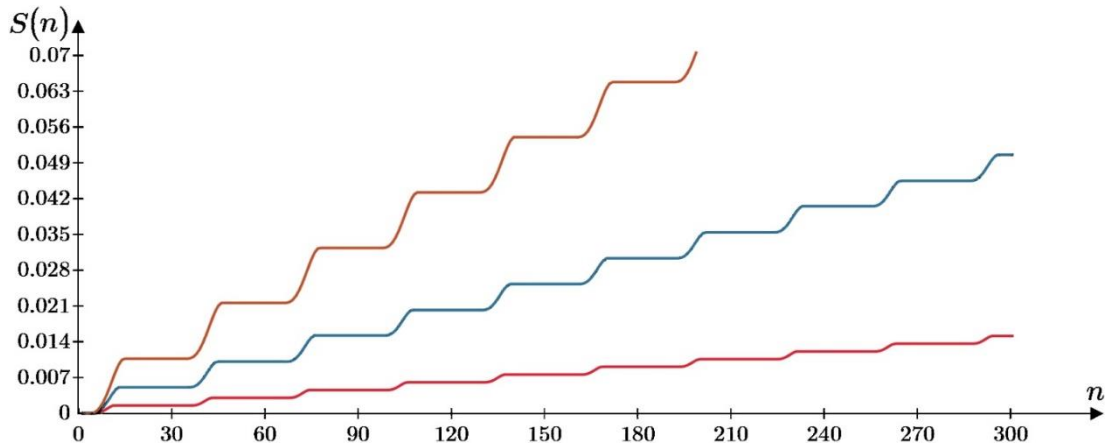


Рис.4. График перемещения штампа  $S$  от времени  $t$  для различных значений сдвигающей силы:  $T_1 = 7$  кН (—),  $T_2 = 8$  кН (—) и  $T_3 = 9$  кН (—)

**Перемещение стержня сквозь песчаный образец с обжимающим боковым давлением под действием динамической нагрузки при нарушении условия предельного равновесия.** Рассмотрена задача о перемещении стержня под действием динамической нагрузки сквозь песчаный образец грунта при боковом обжимающем давлении (рис.5).

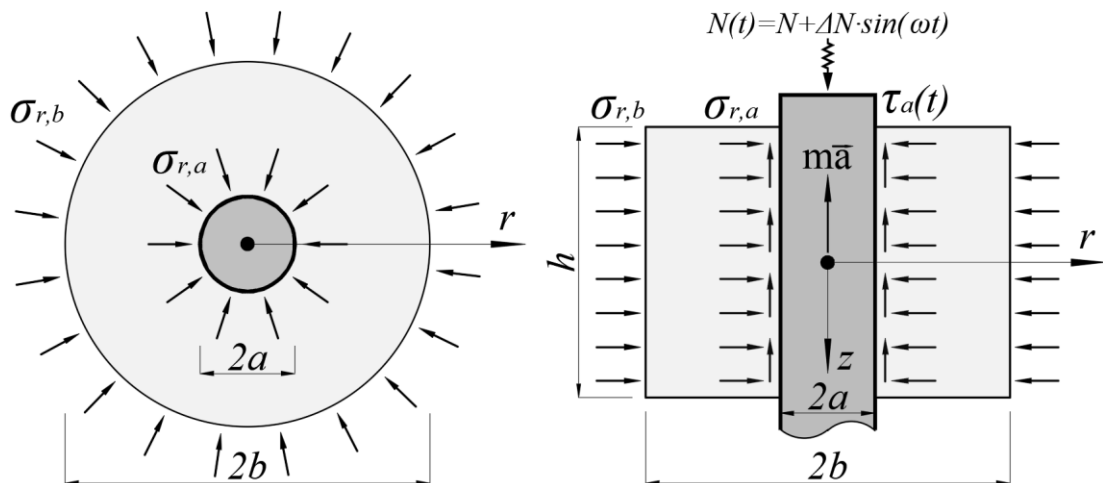


Рис.5. Иллюстрация задачи о перемещении стержня сквозь среду с обжимающим давлением под действием динамической нагрузки

Проверка полученного решения и построение графиков полученных функций выполнены в программе Mathcad для различных значений амплитуды динамической составляющей нагрузки, сдвигающей силы и частоты. Для выполнения вычислений приняты следующие исходные данные:  $N = 85$  кН,  $\Delta N = 20$  кН,  $\omega = 20$  рад/с,  $\varphi = 30^\circ$ ,  $\nu = 0,33$ ,  $m = 1$  т,  $h = 1,0$  м,  $a = 0,2$  м,  $b = 0,6$  м,  $\sigma_{r,b} = 100$  кПа. На рис.6 приведен график зависимости перемещения стержня  $S$  от времени  $t$  при шаге  $n=0,01$  сек. (развертка по времени  $6 \cdot 10^3 n$  соответствует 60 сек.).

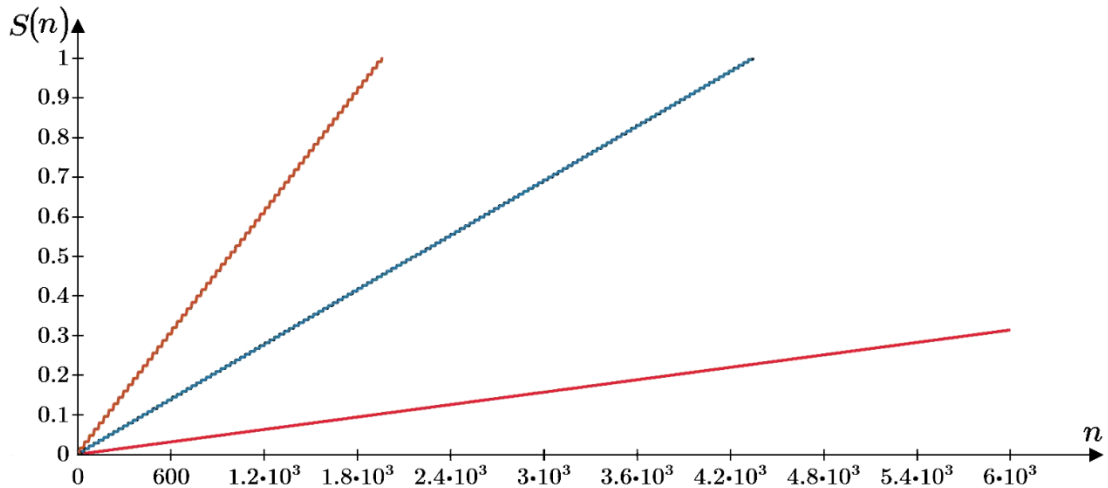


Рис.6. График перемещения стержня  $S$  от времени  $t$  для различных значений амплитуды динамической составляющей нагрузки:  
 $\Delta N_1 = 20$  кН (—),  $\Delta N_2 = 22$  кН (—) и  $\Delta N_3 = 24$  кН (—)

**Вибрационное погружение сваи в однородное песчаное основание с учетом проявления виброползучести.** Рассмотрена задача о вибрационном погружении сваи под действием динамической нагрузки в условиях квазидинамической постановки: песчаная среда обретает вязкое свойство за счет колебания, а погружение сваи осуществляется за счет статической составляющей нагрузки. Расчетная схема к данной задаче приведена на рис.7. Скорость погружения пяты сваи в вязкую среду  $\dot{s}_R$  представляется возможным принять по закону Стокса (1).

$$\dot{s}_R = \frac{R}{6\pi \cdot a \cdot \eta_0} = \frac{\sigma_R \cdot \pi \cdot a^2}{6\pi \cdot a \cdot \eta_0} = \frac{\sigma_R \cdot a}{6\eta_0} \quad (1)$$

где  $R$  – сила нормального сопротивления под пятой сваи;  $a$  – радиус сваи;  $\eta_0$  – коэффициент вязкости грунта под пятой сваи;  $\sigma_R$  – нормальное давление под пятой сваи.

Определение скорости погружения сваи по боковой поверхности  $\dot{s}_f$  имеет вид (2).

$$\dot{s}_f = 2 \cdot \frac{\tau(a) \cdot w_0 \cdot a^2}{\beta \cdot r^3} \cdot \left( \frac{1}{a^3} - \frac{1}{b^3} \right) \quad (2)$$

где  $w_0$  – амплитуда виброускорения колебаний сваи;  $\beta$  – коэффициент пропорциональности между коэффициентом вязкости песчаного грунта и амплитуда виброускорения его колебаний.

Подставляя уравнения для скорости погружения пяты сваи  $\dot{s}_R$  (1) и скорости погружения по боковой поверхности  $\dot{s}_f$  (2) в условие равенства перемещений, а также в условие уравнивания внешней нагрузки сопротивлением под пятой сваи и по боковой поверхности получаем выражение (3).

Построение графиков полученных функций выполнено в программе Mathcad для различных значений динамической составляющей нагрузки, статической нагрузки, частоты колебаний и радиуса сваи. В вычислениях приняты следующие

исходные данные:  $N = 100$  кН,  $\Delta N = 40$  кН,  $\omega = 20$  рад/с,  $m = 4$  т,  $a = 0,2$  м.

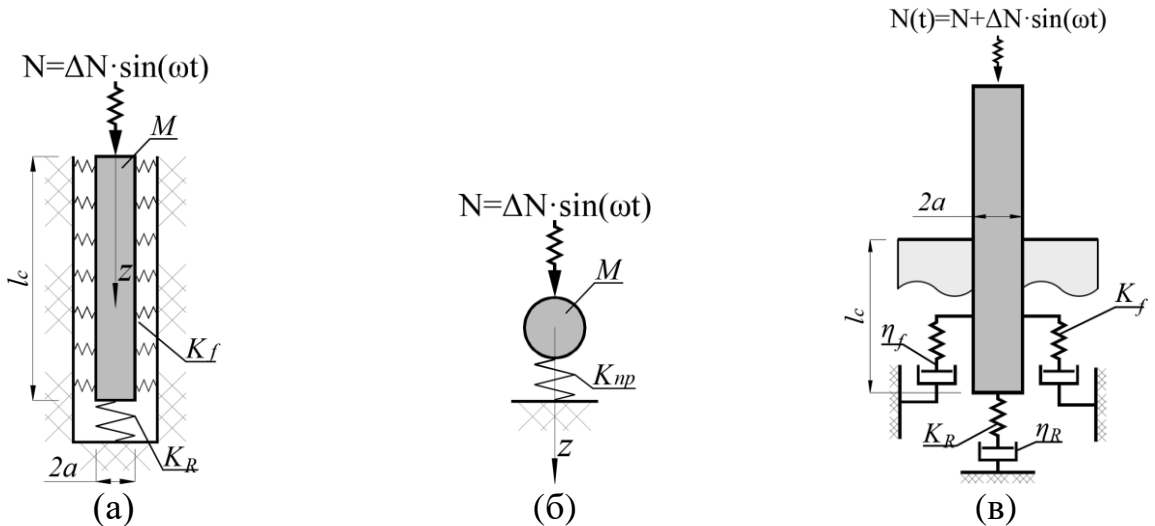


Рис.7. Модель колебаний сваи (а, б) и упруговязкая модель погружения сваи (в)

$$\vartheta = \dot{s}_f = \dot{s}_R = \frac{N \cdot w_0 \cdot a \cdot \left(\frac{1}{a^3} - \frac{1}{b^3}\right)}{\pi \cdot l_c \cdot \beta + 6\pi \cdot \beta \cdot a^2 \cdot \left(\frac{1}{a^3} - \frac{1}{b^3}\right)} \quad (3)$$

На рис.8 приведен график зависимости скорости погружения сваи  $\vartheta$  от глубины погружения  $l_{un}$  для различных значений динамической составляющей нагрузки  $\Delta N_i$ . На рис.9 приведен график зависимости глубины погружения сваи во времени с показанием колебаний сваи, полученный совмещением упругих колебаний сваи со скоростью ее вязкого погружения. Масштаб рис.9,а не позволяет отобразить особенность графика: график является не просто кривой, а в приближении имеет форму синусоиды (рис.9,б), т.е. отражает накопление деформаций с каждым циклом колебаний.

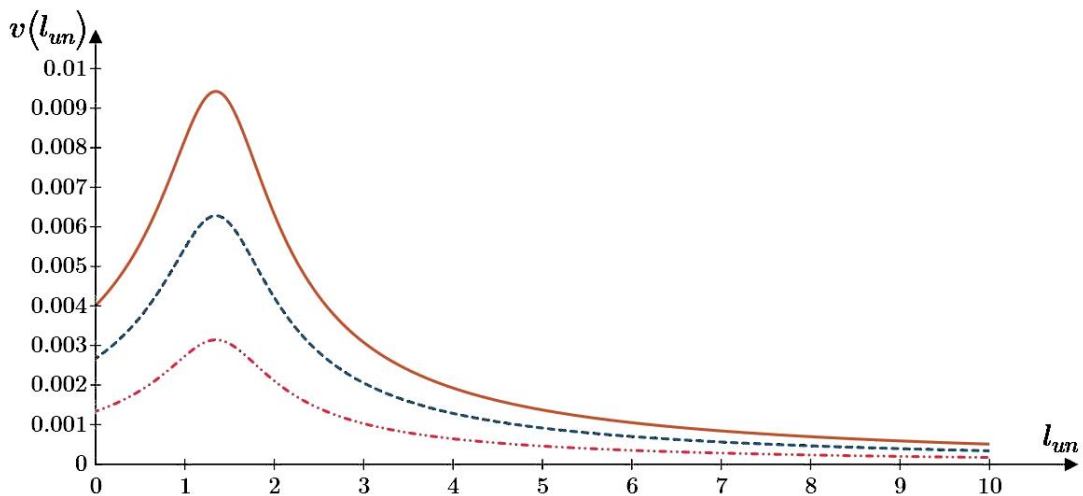


Рис.8. График зависимости скорости погружения сваи  $\vartheta$  от глубины погружения  $l_{un}$  для различных значений динамической составляющей нагрузки:  $\Delta N_1 = 30$  кН (---),  $\Delta N_2 = 60$  кН (---) и  $\Delta N_3 = 90$  кН (—)

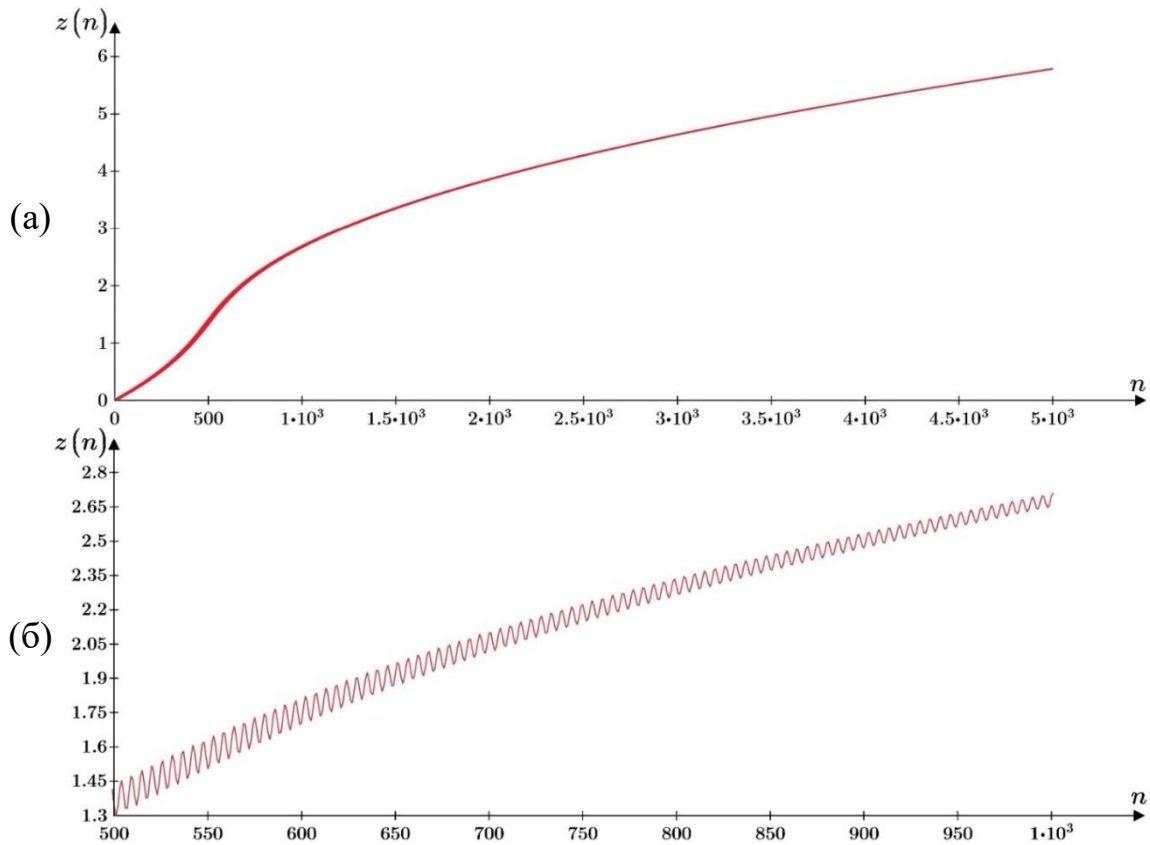


Рис.9. График зависимости глубины погружения сваи  $z$  от времени (а) и увеличенный фрагмент для иллюстрации синусоидального характера колебаний (б)

**Развитие осадки одиночного вибрирующего фундамента на песчаном основании с учетом виброползучести.** Рассмотрена задача о развитии осадки во времени одиночного фундамента на примере трубной мельницы огнеупорных материалов на однородном песчаном неводонасыщенном основании, под подошвой которого возникает статическое  $p_1$  и динамическое давление  $\Delta p \cdot \sin(\omega \cdot t)$ . Расчетная схема фундамента трубной мельницы приведена на рис.10.

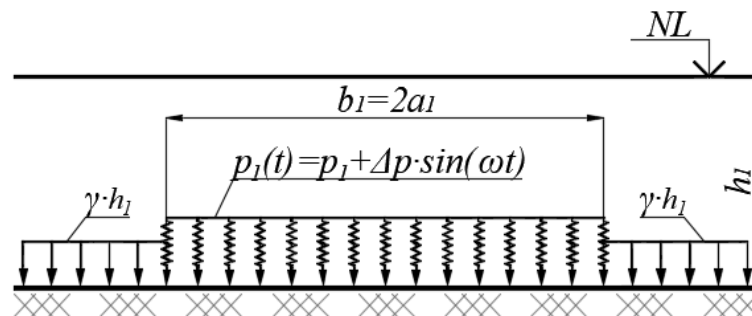


Рис.10. Расчетная схема

Решение приводится в условиях квазидинамической постановки задачи. Осадка фундамента во времени  $s(t)$  складывается из упругой составляющей  $s_{ст}$ , которую получает фундамент от статической составляющей нагрузки  $p_1$  до эксплуатации, и вязкопластической составляющей  $s_{дин}(t)$ , которую получает фундамент после начала эксплуатации размещенного оборудования, создающего дина-

мическое воздействие. Вязкопластическая составляющая осадки  $s_{\text{дин}}(t)$  определяется по формуле (4). В результате получено семейство кривых осадки фундамента при различных значениях статической и динамической составляющих нагрузки. На рис.11 однозначно прослеживается, что с ростом статической и динамической составляющей нагрузки осадка фундамента увеличивается, при этом рост динамической составляющей оказывает более существенный вклад.

$$s_{\text{дин}}(t) = \int \varepsilon_z^{\text{дин}} dz = \int \left[ \frac{\tau_i}{\alpha \cdot \eta_0 \cdot e^{-\delta \cdot a} \cdot \frac{\tau_i^* - \tau_i}{\tau_i}} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot t}) \right] dz \quad (4)$$

где  $\tau_i$  – интенсивность касательных напряжений;  $\tau_i^*$  – предельные касательные напряжения;  $\alpha$  – экспериментальный реологический параметр упрочнения;  $\delta$  – экспериментальный коэффициент, показывающий зависимость вязкости от виброускорения колебаний;  $a$  – виброускорение колебаний;  $\eta_0$  – коэффициент вязкости перед началом вибрационного нагружения.

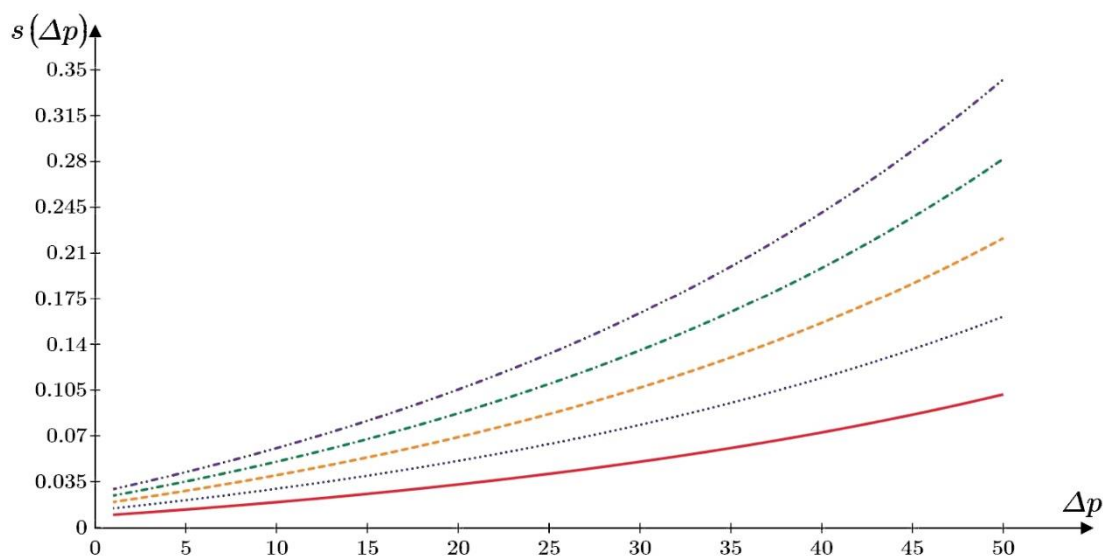


Рис.11. График зависимости величины дополнительной осадки фундамента от величины динамической составляющей нагрузки  $\Delta p$  при различных значениях статической составляющей нагрузки  $p_I$ : (—) –  $p_I=80$  кПа; (.....) –  $p_I=120$  кПа; (---) –  $p_I=160$  кПа; (-.-.-) –  $p_I=200$  кПа; (.....) –  $p_I=240$  кПа

**Осадка фундамента объекта окружающей застройки с учетом виброползучести песчаного основания.** Расчетная схема фундаментов существующего цеха рассева готовой продукции и возводимой трубной мельницы приведена на рис.12.



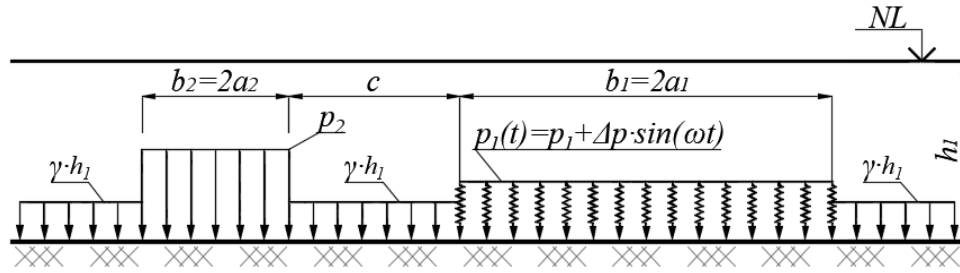


Рис.12. Расчетная схема

График зависимости величины дополнительной осадки фундамента окружающей застройки  $s_2$  от статической нагрузки от фундамента-источника  $p_1$  при динамической составляющей  $\Delta p=30$  кПа и различных величинах нагрузки  $p_2$  приведен на рис.13.

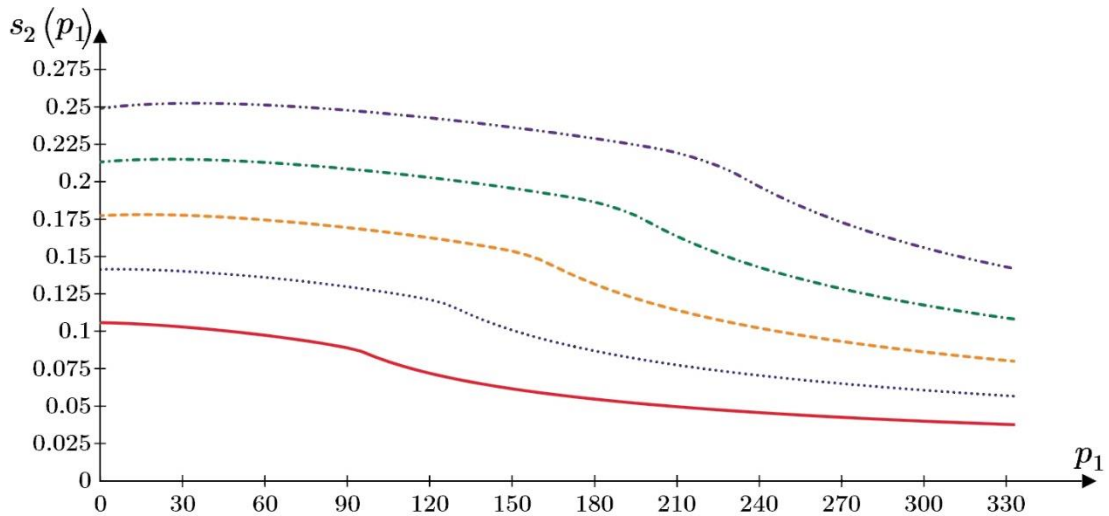


Рис.13. График зависимости величины дополнительной осадки фундамента окружающей застройки  $s_2$  от статической нагрузки от фундамента-источника  $p_1$  при динамической составляющей  $\Delta p=30$  кПа, расстоянии между фундаментами  $c=4,0$  м и величинах нагрузки  $p_2$ : (—) —  $p_2=160$  кПа; (.....) —  $p_2=200$  кПа; (---) —  $p_2=240$  кПа; (-·-·-) —  $p_2=280$  кПа; (— — —) —  $p_2=320$  кПа

Из рассмотрения графика  $s_2(p_1)$  (рис.13) однозначно прослеживается уменьшение осадки соседнего фундамента с увеличением статической нагрузки от фундамента-источника  $p_1$ , что объясняется увеличением разницы между интенсивностью касательных напряжений  $\tau_i$  и их предельным значением  $\tau_i^*$ , которое в свою очередь зависит от величины среднего напряжения  $\sigma_m$ . Можно наглядно показать влияние нагрузки от фундамента-источника  $p_1$  на осадку соседнего фундамента, используя коэффициент  $k_{ult}$  (5), показывающего уменьшение коэффициента вязкости  $\eta_0$  с приближением интенсивности касательных напряжений  $\tau_i$  к их предельному значению  $\tau_i^*$ .

$$k_{ult} = \frac{\tau_i^* - \tau_i}{\tau_i^*} \quad (5)$$

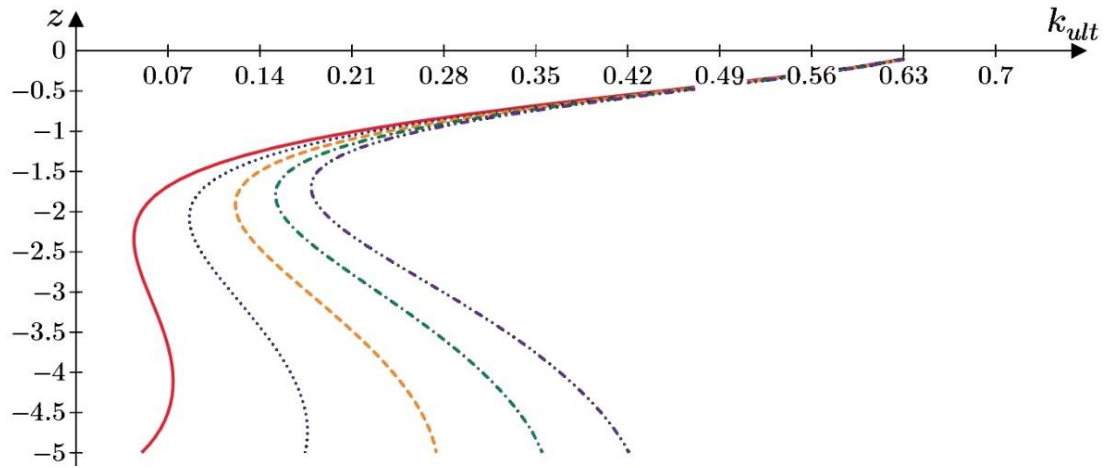


Рис.14. График зависимости коэффициента  $k_{ult}(z)$  под соседним фундаментом при нагрузке  $p_2=300$  кПа и значениях нагрузки  $p_1$ : (—) —  $p_1=160$  кПа; (.....) —  $p_1=200$  кПа; (- - -) —  $p_1=240$  кПа; (- · - · -) —  $p_1=280$  кПа; (· · · · ·) —  $p_1=320$  кПа

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Аналитический обзор научных публикаций в области современного состояния динамики грунтов показал, что изучение работы оснований в условиях динамических воздействий является весьма актуальным пластом механики грунтов и геотехники. Актуальность проработки данной темы лучшим образом иллюстрируется большим количеством отказов сооружений, отмеченных в работах Терцаги К. и Пек Р., Баркана Д.Д., Савинова О.А., Александрова Б.К., Пятецкого В.М., Ершова Р.А., Романова А.А., Филиппова Р.Д. и других исследователей и выраженных в проявлении колоссальных незатухающих перемещений как фундаментов конструкций, являющихся источниками динамических воздействий, так и фундаментов окружающей застройки, а также в возникновении критических повреждений их строительных конструкций.

2. Для исследования проявления вязкости в сыпучем грунте в условиях вибрационного нагружения предложена и запатентована конструкция грунтового динамического шарикового вискозиметра (патент № RU 2 775 356 С1), позволяющего проводить измерения с постоянством и контролем постоянства обжимающего давления на всем пути перемещения шарика с преимущественно сдвиговыми деформациями.

3. По результатам ряда экспериментов, проведенных на предложенной конструкции прибора и направленных на изучение проявления виброползучести при различных уровнях обжимающего давления и интенсивности касательных напряжений, подтверждено, что коэффициент вязкости нелинейно зависит от величины интенсивности касательных напряжений и средних напряжений, что позволяет перейти к дробно-линейной зависимости Тимошенко, учитывающей их влияние, что соответствует результатам ранее проведенных исследований. Полученные

экспериментальные зависимости нашли теоретическое объяснение на уровне взаимодействия зерен песка между собой: увеличение интенсивности касательных напряжений приводит к увеличению касательных сил на контакте между зёрнами, приводящих к потере устойчивости гранул песка и их взаимному смещению, приводящему к возникновению угловых деформаций грунта, а обжимающее давление увеличивает нормальные контактные силы между частицами, формирующими силы трения, препятствующие потере устойчивости.

4. Предложена реологическая модель для коэффициента вязкости щебено-песчаного композита при действии вибрации по формуле для вязкости дисперсной системы А. Эйнштейна.

5. Решена задача о перемещении штампа по поверхности грунта под действием боковой нагрузки при вертикальном нагружении статической и динамической нагрузкой с нарушением условия предельного равновесия, как это натурно смоделировано П.Л. Ивановым. В результате решения задачи установлено, что скорость перемещения штампа увеличивается с ростом амплитуды динамической нагрузки и с ростом значения статической сдвигающей силы при прочих равных условиях. Подход к решению задачи может быть полезен для решения задач о перемещении фундаментов при значительных динамических нагрузках, аналогично, как это предложено Е.В. Березанцевой.

6. Решена задача о перемещении стержня под действием динамической нагрузки через песчаный цилиндр с обжимающим давлением с нарушением условия предельного равновесия. Для нахождения контактных напряжений на поверхности стержня решена задача Г. Ляме с использованием функции напряжений К.В. Соляника-Красса. В результате решения задачи установлено, что скорость перемещения стержня увеличивается с ростом амплитуды динамической нагрузки и с ростом статической силы, как это отмечено в натурных исследованиях Преображенской Н.А., и угла внутреннего трения. Подход к решению задачи может быть полезен для решения задач о погружении свай или отказе грунтового анкера при значительных динамических нагрузках, как это принято в расчетной модели Шехтер О.Я.

7. В квазидинамической постановке решена задача о вибропогружении свай в однородное песчаное основание с учетом проявления виброползучести песчаного грунта с изменяющимся коэффициентом вязкости в зависимости от интенсивности распространения колебаний в основании. Аналитическое решение показывает, что скорость погружения свай снижается с глубиной, т.к. возрастает сопротивление погружению по боковой поверхности, а также снижается коэффициент вязкости из-

за уменьшения виброускорений за счет увеличения жесткости основания. На некоторой глубине при погружении в системе возникает резонанс с увеличением амплитуды колебаний. С ростом статической нагрузки на сваю происходит увеличение скорости ее погружения, что объясняется увеличением интенсивности касательных напряжений, которая приводит к увеличению скорости угловых деформаций. Увеличение динамической нагрузки на сваю и частоты колебаний также приводит к возрастанию скорости погружения, что объясняется ростом виброускорений и, как следствие, снижением коэффициента вязкости, способствуя более интенсивному протеканию угловых деформаций. Выявленные зависимости подтверждаются натурными исследованиями Баркана Д.Д., Преображенской Н.А., Савинова О.А., Qin Z. и др., Ngoc N.A. и др., Moriyasu S. и др., Lee S.-H. и др., Schönit M., Reusch D.

8. Решена задача об осадке фундамента, на который передается динамическая нагрузка, на песчаном основании с учетом проявления виброползучести. В результате решения показано, что осадка фундамента возрастает с увеличением статической и динамической составляющих нагрузки, при этом более существенный вклад в развитие осадки вносит именно динамическая ее составляющая, формируемая вязкопластическим сдвигом типа двустороннего выпора, как это отмечается по результатами полевых исследований Керчмана В.И. Увеличение осадки с ростом динамической составляющей обусловлено снижением коэффициента вязкости с ростом виброускорений колебаний основания, а увеличение осадки с ростом статической составляющей вызвано ростом интенсивности касательных напряжений в основании  $\tau_i$  и их приближением к предельным напряжениям  $\tau_i^*$ . Данный вывод, полученный из теоретического решения, согласуется с результатами масштабных полевых испытаний В.А. Ильичева, В.И. Керчмана, Б.И. Рубина, В.М. Пятецкого.

9. В квазидинамической постановке решена задача об осадке фундамента окружающей застройки в зоне фундамента-источника динамического воздействия с учетом виброползучести песчаного основания на примере возведения трубной мельницы огнеупорных материалов рядом с существующим цехом рассева готовой продукции. В результате решения показано, что осадка фундамента окружающей застройки закономерно увеличивается с ростом статического давления под его подошвой, но уменьшается с увеличением статической составляющей нагрузки от фундамента-источника и глубины заложения фундамента, что объясняется увеличением разности между значениями интенсивности касательных напряжений  $\tau_i$  и их предельным значением  $\tau_i^*$ , первое из которых снижается за счет приближения напряженного состояния основания к компрессионному, а второе – увеличивается

за счет роста среднего напряжения  $\sigma_m$ . Полученные теоретические результаты решения задачи согласуются с результатами натурных исследований Боголюбчика В.С., Хаина В.Я. и Гольдштейна М.Н. в части влияния статической и динамической нагрузки, а также превышения дополнительной осадки тяжело нагруженных фундаментов-приемников по сравнению с менее нагруженными фундаментами-источниками, как это отмечает Савинова О.А.

10. Автор видит перспективу разработки темы в выявлении зависимости влияния интенсивности динамической нагрузки на коэффициент Пуассона и количественном описании влияния вида напряженно-деформированного состояния песчаного грунта на интенсивность проявления виброползучести, например, с учетом параметра Надаи-Лоде. Увеличение коэффициента Пуассона приводит к росту давления на подземные конструкции (например, на подпорные стены, ограждение котлована, обделка тоннелей и т.д.), что необходимо учитывать для более точного прогнозирования поведения конструкций и имеет прямой практический интерес. Формирование более универсальной реологической модели деформирования песчаного грунта при действии вибрации, учитывающей напряженно-деформированное состояние, также важно для прогнозирования перемещений основания в инженерной деятельности.

#### **IV. СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Полученные основные положения и результаты диссертационного исследования поэтапно полностью опубликованы в 8 научных работах, в том числе 4 статьи – в журналах, входящих в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук» (Перечень рецензируемых научных изданий).

**Публикации в изданиях, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий:**

1. Тер-Мартirosян З.Г., Шебуняев А.Н. Перемещение длинного стержня сквозь песчаный образец под действием динамической нагрузки. Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал. – 2022. – № 3 (41). – С. 27-31. DOI: 10.52684/2312-3702-2022-41-3-27-31.
2. Шебуняев А.Н. Обзор результатов исследований влияния колебаний на физико-

механические свойства песчаных грунтов. Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал. – 2022. – № 3 (41). – С. 15-22. DOI 10.52684/2312-3702-2022-41-3-15-22.

3. Тер-Мартirosян З.Г., Шебуняев А.Н., Демин И.Е. Грунтовый динамический шариковый вискозиметр. Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал. – 2023. – № 1 (43). – С.5-9. DOI 10.52684/2312-3702-2023-43-1-5-9.

4. Тер-Мартirosян З.Г., Шебуняев А.Н., Демин И.Е. Влияние напряженного состояния песчаного грунта на интенсивность виброползучести. Инженерно-строительный вестник Прикаспия: научно-технический журнал. – 2023. – № 1 (43). – С.10-14. DOI 10.52684/2312-3702-2023-43-1-10-14.

**Публикации в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science и др.:**

1. Ter-Martirosyan, A.Z.; Shebunyaev, A.N.; Sobolev, E.S. Settlement of a Foundation on an Unsaturated Sandy Base Taking Vibrocreep into Account. Axioms 2023, 12, 594. <https://doi.org/10.3390/axioms12060594>.

2. Ter-Martirosyan, A.Z.; Shebunyaev, A.N.; Sidorov, V.V. Mathematical Analysis of the Vibratory Pile Driving Rate. Axioms 2023, 12, 629. <https://doi.org/10.3390/axioms12070629>.

**Статьи, опубликованные в других научных журналах и изданиях:**

1. Шебуняев А.Н. Обзор результатов исследований в области изучения распространения колебаний в полупространстве // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: сб. ст. по матер. XXXIX междунар. науч.-практ. конф. №5(31). – Новосибирск: СибАК, 2021. – С.83-97.

2. Шебуняев А.Н. Решение задачи о перемещении вибрирующего штампа по горизонтальной поверхности грунта под действием боковой нагрузки // Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований: сб. ст. по матер. L междунар. науч.-практ. конф. № 4(42). – Новосибирск: СибАК, 2022. – С. 69-78.

В результате научной работы сформирован **объект интеллектуальной собственности** – изобретение – Грунтовый динамический шариковый вискозиметр (Патент № RU 2 775 356 C1 Российская Федерация, МПК G01N 11/10 (2006.01). Грунтовый динамический шариковый вискозиметр: №2021128334: заявл. 28.09.2021; опубл. 29.06.2022/ Тер-Мартirosян З.Г., Шебуняев А.Н., Демин И.Е.; заявитель НИУ МГСУ).