

На правах рукописи



**АНТИПОВ ВАДИМ ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**НЕРАЗРУШАЮЩИЙ МЕТОД ОПЕРАТИВНОЙ ОЦЕНКИ МОДУЛЯ  
ДЕФОРМАЦИИ ПЕСЧАНЫХ И ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПЕРМСКОГО  
КРАЯ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ ОСНОВАНИЙ И  
ФУНДАМЕНТОВ**

05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пермь – 2021

Работа выполнена на кафедре «Строительное производство и геотехника» в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель:

**Офрихтер Вадим Григорьевич**

Доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

**Невзоров Александр Леонидович**

Доктор технических наук, профессор

ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова», заведующий кафедрой инженерной геологии, оснований и фундаментов

**Королев Константин Валерьевич**

Доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой «Геотехника, тоннели и метрополитены»

Ведущая организация

**ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» (НГАСУ (Сибстрин))**

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г. в \_\_:\_\_ (по местному времени) на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.187.02 на базе Акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт гидротехники имени Б.Е. Веденеева», Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195220, Санкт-Петербург, ул. Гжатская, д. 21.

E-mail: [ivanovatv@vniig.ru](mailto:ivanovatv@vniig.ru), тел. +7 (812) 493-93-63.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке АО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» и на сайте [www.vniig.rushydro.ru](http://www.vniig.rushydro.ru).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук

Т.В. Иванова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В настоящее время исходные данные для геотехнических расчетов по результатам полевых исследований предоставляются на основе результатов испытаний традиционными разрушающими методами: бурение и отбор проб, зондирование, испытания штампами, испытания радиальным прессиометром, испытания дилатометром и т.д. Для всех этих методов характерны значительная стоимость, временные и трудовые затраты. При предварительных геотехнических прогнозах на этапе предпроектных работ, возникает потребность в развитии и использовании недорогих оперативных неразрушающих методов, позволяющих при небольших трудовых затратах в короткий период времени выполнить предварительную геотехническую оценку ситуации на исследуемой площадке. Среди подобных методов выделяется неразрушающий метод многоканального анализа поверхностных волн (англ. Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW), который основан на интерпретации данных о распространении поверхностных волн рэлеевского типа в грунтовом массиве, вызванных различными динамическими источниками и на которые уходит до 70 % энергии. Этот метод при относительно малой трудоемкости и сжатых сроках испытаний позволяет получить волновой профиль разреза, определить на полученной картине наличие/отсутствие аномальных участков в грунтовом массиве и оценить по эмпирическим корреляционным зависимостям необходимые для геотехнических расчетов физико-механические характеристики грунтов. В отечественной практике имеется большое количество практических методов оценки физико-механических характеристик грунтов по скоростям объемных волн, но отсутствуют методы оценки по скоростям поверхностных волн. Поэтому задача разработки практических методов оценки физико-механических характеристик песчаных и глинистых грунтов по результатам высокопроизводительного неразрушающего метода многоканального анализа поверхностных волн является актуальной. В настоящей работе рассматриваются песчаные и глинистые грунты. Данным термином в диссертации обозначены нормально уплотненные несвязные (пески) и связные (супеси, суглинки, глины) минеральные дисперсные грунты вне криолитозоны при положительной температуре, для которых разрабатывались методы предварительной оценки физико-механических свойств. Указанные грунты рассматривались в верхней части разреза на глубине до 6,5 м с удельным весом от 16,0 до 20,8 кН/м<sup>3</sup> на территории Пермского края.

Тема диссертационной работы соответствует паспорту специальности 05.23.02 Основания и фундаменты, подземные сооружения, пункт 1: «Разработка научных основ и практических методов инженерно-геологических и

гидрогеологических изысканий, основанных на математических моделях грунтовой среды и горных пород и обеспечивающих методы расчета оснований, фундаментов и подземных сооружений исходной информацией о физико-механических характеристиках грунтовой среды и горных пород».

### **Степень разработанности темы**

Активное изучение и описание волновых процессов в грунтах началось в начале XX века и связано с такими зарубежными учеными, как J. W. S. Rayleigh, H. Lamb, M. A. Biot, K. F. Graff, J. D. Achenbac, P. Buchen и др. За рубежом примерно с 20-х годов XX века стали разрабатываться и совершенствоваться волновые методы описания геологического разреза. Этим вопросом занимались такие ученые, как A. Ben-Menahem, Y. Singh, B. Romanowicz, A. A. Dziewonski, G. Nolet, G. F. Pansa, G. A. McMechan, M. J. Yedlin, R. B. Jones, S. Nazarian, K. H. Stokoe II, C. B. Park, J. N. Louie, J. Xia, R. D. Miller, S. Foti и др. В отечественной практике с середины 20-х годов XX века и по настоящее время вопросами распространения волн в верхней части грунтового массива и применения волновых методов для изучения инженерно-геологического разреза активно занимались такие ученые, как Г. А. Гамбурцев, В. И. Бондарев, В. Н. Никитин, И. Г. Миндель, А. Л. Левшин, М. Л. Владов, А. В. Старовойтов, В. В. Капустин, С. А. Федотов, О. К. Воронков, Н. Н. Горяинов, Ф. М. Ляховицкий, В. Г. Офрихтер и др. По результатам различных исследований имеются рекомендации по оценке физико-механических характеристик грунтов по скоростям объемных волн. Однако эти рекомендации основаны на достаточно трудоемких методах волнового анализа, требующих специальных навыков при обработке и интерпретации результатов, что затрудняет их применение для оперативной геотехнической оценки ситуации.

В связи с этим с 1980-х годов S. Nazarian и K. H. Stokoe II начинают развивать поверхностные волновые методы. В 1998 г. G. Lefebvre и M. Karray предлагают не получивший широкого распространения мультимодальный анализ поверхностных волн. В 1999 году С. В. Park предложен более простой метод многоканального анализа поверхностных волн. Этот метод основан на анализе распространения упругих поверхностных колебаний рэлеевского типа. Метод имеет простую процедуру: при полевых испытаниях 24 приемника выстраиваются в линию, выносится источник колебаний на некоторое расстояние, выполняется 1 удар и запись колебаний, и проводится обработка сигнала на компьютере. За счет увеличения числа приемников и избавления от необходимости их многократной перестановки метод позволил быстро и недорого анализировать поверхностные волны, нежели традиционные объемные. В отечественной практике этому методу уделено мало внимания, и для него не разработаны рекомендации по оценке физико-механических характеристик грунтов.

**Цель диссертационной работы.** Разработка практического неразрушающего метода оперативной оценки модуля деформации несвязных (пески) и связных (супеси, суглинки, глины) минеральных дисперсных грунтов Пермского края вне криолитозоны при положительной температуре по результатам многоканального анализа поверхностных волн, обеспечивающего методы расчета оснований исходной информацией.

**Задачи исследования:**

1. Анализ современного состояния методов определения и оценки модуля деформации песчаных и глинистых грунтов для предварительных расчетов оснований и фундаментов.

2. Оценка достоверности сведений о напластовании грунтов, получаемых для предварительных расчетов оснований и фундаментов неразрушающим методом многоканального анализа поверхностных волн.

3. Разработка неразрушающего метода оперативной оценки модуля деформации песчаных и глинистых грунтов Пермского края для предварительных расчетов оснований и фундаментов.

4. Разработка метода построения модельной кривой деформирования песчаных и глинистых грунтов Пермского края по результатам многоканального анализа поверхностных волн для предварительных расчетов оснований и фундаментов.

5. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния при испытаниях песчаных и глинистых грунтов штампами с использованием модельной кривой деформирования при предварительных расчетах оснований и фундаментов.

6. Разработка практических рекомендаций по оперативной оценке модуля деформации и построению модельной кривой деформирования песчаных и глинистых грунтов Пермского края по результатам многоканального анализа поверхностных волн для предварительных расчетов оснований и фундаментов.

**Объект исследования:** практический неразрушающий метод оперативной оценки модуля деформации песчаных и глинистых грунтов многоканальным анализом поверхностных волн, обеспечивающий методы расчета оснований, фундаментов и подземных сооружений исходной информацией о физико-механических характеристиках грунтов.

**Предмет исследования:** физико-механические характеристики грунтов, оцениваемые по результатам исследований неразрушающим методом многоканального анализа поверхностных волн.

**Научная новизна работы.**

1. Предложен неразрушающий метод оценки модуля деформации песчаных и глинистых грунтов Пермского края для предварительных расчетов оснований и

фундаментов по результатам полевых испытаний неразрушающим методом многоканального анализа поверхностных волн (патент № 2704074).

2. Разработан метод построения модельной кривой деформирования песчаных и глинистых грунтов Пермского края для предварительных расчетов оснований и фундаментов по результатам полевых испытаний неразрушающим методом многоканального анализа поверхностных волн (патент № 2728739).

#### **Теоретическая значимость результатов работы.**

1. Получена зависимость между модулем деформации песчаных и глинистых грунтов Пермского края, сопоставимым с испытаниями штампом, и динамическим модулем сдвига, определяемым по результатам многоканального анализа поверхностных волн.

2. Получены зависимости для построения по результатам многоканального анализа поверхностных волн модельной кривой деформирования песчаных и глинистых грунтов Пермского края, сопоставимой с трехосными испытаниями в пределах применения принципа линейной деформируемости.

#### **Практическая значимость.**

1. Разработаны практические рекомендации по оперативной оценке модуля деформации песчаных и глинистых грунтов Пермского края для предварительных расчетов оснований и фундаментов по результатам неразрушающего многоканального анализа поверхностных волн (патент № 2704074).

2. Разработаны практические рекомендации по построению модельной кривой деформирования песчаных и глинистых грунтов Пермского края, сопоставимой с трехосными испытаниями, для предварительных расчетов оснований и фундаментов по результатам многоканального анализа поверхностных волн (патент № 2728739).

**Методология и методы исследования.** Задачи в рамках работы формулировались по результатам аналитического обобщения данных предшествующих исследований. Решались поставленные задачи по результатам запланированных и проведенных полевых, лабораторных и численных экспериментов, и теоретических исследований.

**Степень достоверности полученных результатов.** Экспериментальные работы проводились на поверенном оборудовании в аккредитованной лаборатории. Обработка результатов выполнялась статистическими методами. Для теоретических расчетов, графического и теоретического анализа результатов использовались сертифицированные программные комплексы.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Метод оперативной оценки модуля деформации песчаных и глинистых грунтов Пермского края для предварительных расчетов оснований и фундаментов

по результатам испытаний неразрушающим методом многоканального анализа поверхностных волн.

2. Метод построения модельной кривой деформирования песчаных и глинистых грунтов Пермского края для предварительных расчетов оснований и фундаментов по результатам испытаний неразрушающим методом многоканального анализа поверхностных волн.

3. Оценка модуля деформации с применением модельной кривой деформирования методом численного моделирования для предварительных расчетов оснований и фундаментов.

**Личный вклад автора** состоит в формулировании целей и задач, поиске их решения путем выполнения экспериментальных и теоретических исследований, анализе полученных результатов, разработке методов оперативной оценки модуля деформации и построения модельной кривой деформирования песчаных и глинистых грунтов Пермского края по результатам полевых испытаний неразрушающим методом многоканального анализа поверхностных волн, выполнении аналитических расчетов и численного моделирования, разработке пошаговых практических рекомендаций по использованию предложенных методов.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты и положения работы докладывались и обсуждались на пяти научно-технических конференциях: Международная научно-техническая конференция «Energy, Environmental and Construction Engineering» (ЕЕСЕ – 2020), г. Санкт-Петербург, СПбПУ, 19–20 ноября 2020 г.; Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы геотехники: новые материалы, конструкции, технологии и расчеты», г. Санкт-Петербург, СПбГАСУ, 6–8 февраля 2019 г.; XVIII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», г. Санкт-Петербург, СПбГУ, 15–17 апреля 2020 г.; Национальная научно-техническая конференция с иностранным участием «Нелинейная механика грунтов и численные методы расчетов в геотехнике и фундаментостроении», г. Воронеж, ВГТУ, 6–8 ноября 2019 г.; XI Всероссийская молодежная конференция аспирантов, молодых ученых и студентов «Современные технологии в строительстве. Теория и практика», г. Пермь, ПНИПУ, 27–29 марта 2019 г.

Практическое внедрение результатов диссертации осуществлено в ООО «ВерхнекамТИСИЗ», что подтверждается справкой.

**Публикации по результатам исследований.** По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, включенных 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», 3 работы опубликованы в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus и Web of Science, получено 2 патента на изобретение. В диссертации использованы результаты научных работ, выполненных автором – соискателем ученой степени кандидата технических наук – лично и в соавторстве.

**Объем и структура работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, шести приложений. Работа изложена на 182 листах, содержит 47 таблиц, 55 рисунков и список литературы из 201 наименования, в том числе 79 на иностранном языке.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту и сведения об апробации результатов работы.

**Глава 1 «Анализ современного состояния методов определения и оценки модуля деформации грунтов»** посвящена анализу лабораторных и полевых методов определения и оценки модуля деформации песчаных и глинистых грунтов для предварительных геотехнических расчетов: наиболее распространенных традиционных разрушающих методов, согласно действующим нормативным документам, и современных неразрушающих методов волнового анализа. В настоящей работе термином песчаные и глинистые грунты обозначаются несвязные (пески) и связные (супеси, суглинки, глины) минеральные дисперсные грунты. В главе излагается современное состояние вопроса связи упругих и общих характеристик деформирования, которая дает возможность оперативно оценивать модуль деформации по упругим характеристикам песчаных и глинистых грунтов через переходный коэффициент по результатам полевых испытаний современным неразрушающим методом многоканального анализа поверхностных волн (МАПВ). МАПВ основан на анализе скоростей распространения поверхностных волн рэлеевского типа. Метод имеет простую процедуру: при полевых испытаниях 24 приемника выстраиваются в линию, выносятся источник колебаний на некоторое расстояние, выполняется 1 удар с достаточным накоплением для улучшения соотношения «сигнал/шум» и запись колебаний, и проводится обработка сигнала на компьютере. По результатам МАПВ строят скоростной профиль геологического разреза. В МАПВ используется большое число каналов (24 или 48), что избавляет от необходимости многократного переставления пары приемников и значительно снижает

трудоемкость работ по сравнению с другими волновыми методами (КМПВ, МОВ, САПВ). За счет простой технологии полевых работ МАПВ позволяет получить скорость поверхностных волн и границы слоев грунтового напластования уже через 2–3 часа с начала испытаний. Кроме того, для выполнения волновой съемки используется то же оборудование, и та же конфигурация сейсмической косы, что и в методах МОВ, КМПВ, что позволяет, при необходимости, выполнять параллельные наблюдения для определения скорости волн сжатия и сдвига и оценки точности результатов многоканального анализа поверхностных волн.

В главе также обосновывается возможность построения модельной кривой деформирования по результатам МАПВ, которая будет сопоставима с результатами трехосных испытаний в пределах применения принципа линейной деформируемости. Такая модельная кривая будет полезна для получения входных данных при предварительных численных расчетах оснований и фундаментов по оперативно полученным результатам МАПВ.

**Глава 2 «Полевые и лабораторные исследования оснований»** содержит описание и результаты полевых и лабораторных исследований песчаных и глинистых грунтов, и обосновывается 1-ое положение на защиту.

В полевых условиях выполнялись испытания штампами и методом МАПВ на четырех площадках Пермского края с различными грунтовыми условиями. Перечень исследованных грунтов на этих площадках (буква «П» в шифре обозначает полевые условия исследования):

- П.Нас – насыпь из песка мелкого однородного, плотного, маловлажного, коэффициент уплотнения 0,96 (площадка № 1);
- П.Гл – глина тугопластичная, полутвердая (площадка № 2);
- П.Суп – супесь песчанистая, текучая, с прослойками и линзами песка мелкого, водонасыщенного (площадка № 3 точка 1);
- П.Сугл – суглинок тяжелый пылеватый, текучепластичный с включениями органического вещества (площадка № 3 точка 2);
- П.Пес – песок мелкий, средней плотности, маловлажный (площадка № 4).

Для двух площадок были использованы готовые результаты определения физических характеристик и испытаний штампами 600 см<sup>2</sup>, 2500 см<sup>2</sup> и 5000 см<sup>2</sup>: на площадке № 1 результаты предоставлены ЦТИМС «МИКС» ПНИПУ, на площадке № 3 результаты предоставлены ОАО «ВерхнекамТИСИЗ». На остальных площадках были выполнены недостающие работы по определению физических характеристик грунтов в лабораторных условиях по ГОСТ 5180-2015 и испытания штампами 600 см<sup>2</sup> по ГОСТ 20276-2012 в составе автоматизированной штамповой установки ШВ60. В качестве анкерной системы восприятия реактивных усилий были использованы фундаментные блоки ФБС 24-6-6. На всех площадках выполнены испытания неразрушающим методом МАПВ с

использованием системы ТЕЛСС-3, из элементов которой была собрана фланговая система наблюдения ZZ с выносом активного источника колебаний.

По результатам МАПВ строились волновые разрезы, определялись значения динамического модуля сдвига  $G_{0,дин}$  и оценивались значения удельного веса  $\gamma$ . Также выполнялось сравнение скоростных профилей по результатам МАПВ с геологическими колонками. Результаты МАПВ показывают погрешность оценки границ слоев на глубине до 5 м в большинстве случаев в пределах 20 % от мощности слоев. По результатам испытаний штампами определялись модули деформации для двух интервалов нагрузок: интервал нагрузок для первых четырех точек графиков  $S = f(P)$  по ГОСТ 20276-2012; общий для всех площадок интервал нагружения 50–125 МПа.

Динамический модуль сдвига по результатам МАПВ рассчитывался по предложенной формуле для скорости поверхностной волны на основе известной зависимости из теории упругости:

$$G_{0,дин} = 1,1 \cdot 10^{-6} \rho V_R^2, \text{ МПа} \quad (1)$$

где  $V_R$  – скорость поверхностной волны, м/с; рассмотрены песчаные и глинистые грунты, для которых принят динамический коэффициент Пуассона 0,49, который соответствует наименьшим значениям скорости волны сдвига и модуля деформации, что может рассматриваться как запас для наиболее неблагоприятного сочетания при предварительных оперативных расчетах оснований и фундаментов на предпроектном этапе; в связи с этим принято соотношение  $V_R = 0,954 V_s$ ;

$\rho$  – плотность грунтового слоя, кг/м<sup>3</sup>, определялась по результатам лабораторных испытаний отобранных проб грунта.

Стоит отметить, что плотность (удельный вес) в формуле (1) может быть также оценена только по результатам МАПВ. Для этого на основе существующей зависимости Р. W. Мауне для скорости сдвиговой волны для водонасыщенных грунтов предлагается формула (2) для скорости поверхностной волны:

$$\gamma = 0,7 \ln \left( \frac{V_R^{5,16}}{z} \right) + 0,17, \text{ кН/м}^3 \quad (2)$$

где  $z$  – глубина подошвы слоя грунта, м;

$V_R$  – скорость поверхностной волны, м/с.

На основе существующих предпосылок к вопросу связи упругих и общих характеристик деформирования значения динамического модуля сдвига по методу МАПВ сопоставлялись со значениями модулей деформации из испытаний штампами. Для корректного сравнения результатов испытаний штампами между собой и с результатами МАПВ за истинное значение модуля деформации принимался модуль  $E_{5000}$ , определенный для штампа площадью 5000 см<sup>2</sup>. Для

штампов иной площади использован переходный коэффициент по формуле из Прил. Д. СП 23.13330.2018:

$$m = \left( \frac{A_{5000}}{A_i} \right)^{n/2} \quad (3)$$

где  $A_{5000}$  – площадь штампа 5000 см<sup>2</sup>;

$A_i$  – площадь штампа  $i$  см<sup>2</sup>;

$n$  – параметр приведения по Прил. Д. СП 23.13330.2018.

Сопоставление результатов испытаний штампами и методом МАПВ выполнялось через переходный коэффициент  $k_G$  (4) и  $k'_G$  (5) (Таблица 1) для двух интервалов нагружения: по ГОСТ 20276-2012 и 50–125 кПа соответственно.

$$k_G = \frac{E_{5000}}{G_{0,дин}}, \quad k'_G = \frac{E'_{5000}}{G_{0,дин}} \quad (4), (5)$$

где  $E_{5000}$ ,  $E'_{5000}$  – модули деформации, МПа, для штампа площадью 5000 см<sup>2</sup>.

Таблица 1 – Расчет переходных коэффициентов  $k_G$

Грунт	$\gamma_{lab}$ , кН/м <sup>3</sup>	$G_{0,дин}$ , МПа	$E_{5000}$ , МПа	$E'_{5000}$ , МПа	$k_G$	$k'_G$
П.Пес	15,974	32,0	17,2	16,9	0,538	0,529
П.Нас	17,836	111,7	26,4	26,0	0,236	0,233
П.Сугл	18,424	26,4	5,1	5,1	0,193	0,193
П.Суп	19,796	60,0	9,1	9,1	0,152	0,152
П.Гл	20,776	48,2	6,8	6,0	0,141	0,124

В процессе анализа значений переходного коэффициента  $k_G$  установлена зависимость этого коэффициента от удельного веса грунта  $\gamma$ . Изменение удельного веса грунта от 16,0 кН/м<sup>3</sup> до 20,8 кН/м<sup>3</sup> приводит к уменьшению величины  $k_G$  с 0,538 до 0,141 (Рисунок 1а). Установленные зависимости описаны экспоненциальными уравнениями (6) и (7) (Рисунок 1), которые были получены в результате применения известного метода скоростных уравнений первого порядка, предложенного R. L. Handy. Подбор коэффициентов аппроксимации выполнялся в автоматическом режиме в программном комплексе «STATISTICA».

$$k_G = 0,12 + \exp(-0,68\gamma + 10); R^2 = 0,99 \quad (6)$$

$$k'_G = 0,11 + \exp(-0,61\gamma + 8,86); R^2 = 0,99 \quad (7)$$

где  $\gamma$  – удельный вес грунта, кН/м<sup>3</sup>;

$R^2$  – коэффициент детерминации.

В результате анализа выполненных полевых исследований предлагается простая процедура оперативной предварительной оценки модуля деформации по результатам МАПВ для предварительных расчетов оснований и фундаментов по формуле:

$$E = k_G G_{0, \text{дин}} \quad (8)$$

где  $k_G$  – переходный коэффициент по формуле (6);

$G_{0, \text{дин}}$  – динамический модуль сдвига, значение которого рассчитывается по результатам волновой съемки методом МАПВ, МПа.

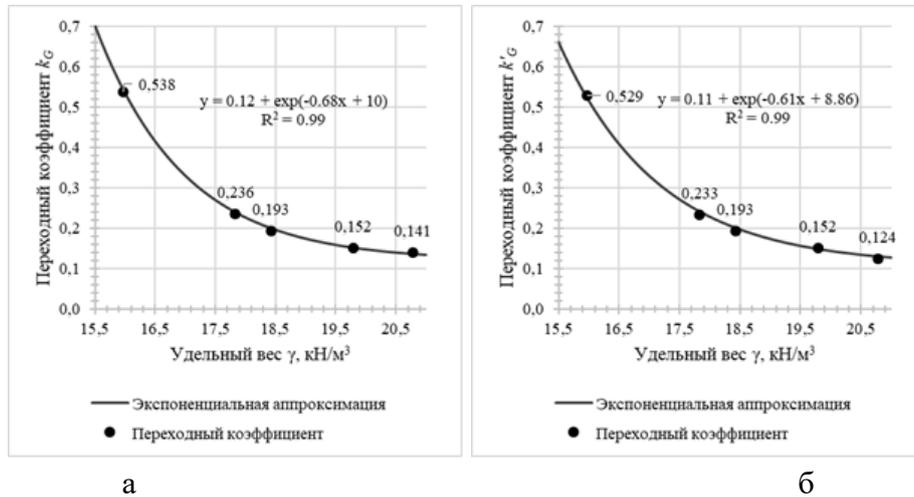


Рисунок 1 – Зависимости переходного коэффициента от удельного веса грунта: а – для модуля деформации, рассчитанного по ГОСТ 20276-2012; б – для модуля деформации в интервале нагрузок 50–125 кПа; сплошные линии – уравнения (6) и (7)

Предложенный метод в целях накопления информации проанализирован для результатов дополнительных шести имеющихся результатов испытаний МАПВ и инженерно-геологических изысканий на территории Пермского края, а также дополнительных пятнадцати полевых испытаний штампом песчаных и глинистых грунтов, предоставленных ООО «Новосибирский инженерный центр». Анализ полученных результатов показал хорошую степень оценки модуля деформации. Предложенная формула (8) демонстрирует сходимость для проанализированных грунтов с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,84$  (Рисунок 2).

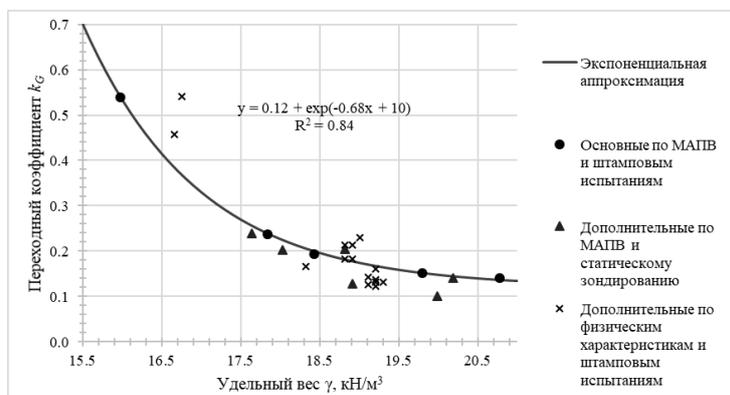


Рисунок 2 – Зависимость переходного коэффициента  $k_G$  от удельного веса грунта  $\gamma$  для пяти основных и пятнадцати дополнительных грунтов

Лабораторные испытания на трехосное сжатие выполнялись с целью выбора и уточнения формы кривой деформирования при разработке алгоритма построения модельной кривой деформирования. Выполнялись испытания на трехосное сжатие водонасыщенных образцов связных и несвязных грунтов с заданными характеристиками в камере типа А (буква «Л» в шифре грунта обозначает лабораторные условия исследования):

- Л.Пес – песок мелкий, водонасыщенный, плотный;
- Л.Гл.1 – глина тяжелая, тугопластичная.

В целях накопления информации в рамках работы также был выполнен анализ результатов трехосных испытаний связных грунтов в камере типа А, предоставленных ООО «НПП «Геотек» и ЦТИМС «МИКС» ПНИПУ:

- Л.Гл.2 – глина полутвердая, легкая пылеватая;
- Л.Сугл.1 – суглинок мягкопластичный;
- Л.Сугл.2 – суглинок мягкопластичный;
- Л.Суп – супесь пластичная, песчанистая.

Лабораторные испытания грунтов на трехосное сжатие выполнялись соискателем на установке трехосного сжатия производства ООО «НПП Геотек» (г. Пенза) ГТ 2.0.9, панель управления давлением ГТ 2.0.11 со статическим и кинематическим режимами нагружения, максимальная нагрузка 1 т (10 кН). Испытания проводились в камере трехосного сжатия типа А ГТ 2.3.8.

Испытанию подвергались образцы песчаного и глинистого грунтов с заданными характеристиками в водонасыщенном состоянии, с восстановлением предполагаемого природного состояния по методу восстановления фазового состояния (ВФС), который автоматически контролировался программным комплексом «АСИС». Испытания проводились согласно указаниям ГОСТ 30416-2012 и ГОСТ 12248-2010 с кинематическим режимом нагружения. Полученные результаты использованы далее для контроля формы кривой деформирования при разработке алгоритма построения модельной кривой деформирования.

**Глава 3 «Построение модельной кривой деформирования грунтов по результатам МАПВ»** содержит анализ наиболее распространенных существующих моделей аппроксимации кривых деформирования грунтов, аналитический вывод предлагаемого экспоненциального уравнения аппроксимации, и аналитические процедуры расчета параметров уравнения аппроксимации для двух моделей: гиперболической и экспоненциальной, приводится разработанный алгоритм построения модельной кривой деформирования, обосновывается 2-е положение, вынесенное на защиту.

Предложенный в диссертации алгоритм построения модельной кривой деформирования по результатам МАПВ позволит оперативно построить модельную кривую деформирования, позволяющую получить исходные

параметры для численного моделирования для выполнения предварительных аналитических и численных расчетов оснований и фундаментов. Форма кривой деформирования при разработке алгоритма выбиралась на основе результатов трехосных испытаний, приведенных в Главе 2.

Кривые деформирования, получаемые по результатам лабораторных испытаний грунтов на трехосное сжатие, часто аппроксимируют с помощью различных моделей  $\sigma_{\text{дев}} = f(\varepsilon_1)$ . Наиболее распространенными моделями аппроксимации являются степенная и гиперболическая:

$$\sigma_{\text{дев}} = A\varepsilon_1^a \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{дев}} = \frac{\varepsilon_1}{1/E_{\text{упр}} + \varepsilon_1/\sigma_{\text{дев,пр}}} \quad (10)$$

где  $\sigma_{\text{дев}} = (\sigma_1 - \sigma_3)$  – девиаторное напряжение, МПа;

$\varepsilon_1$  – относительная вертикальная деформация образца, д. ед.;

$A$  – коэффициент деформирования, МПа

$a$  – коэффициент упрочнения;

где  $E_{\text{упр}}$  – упругий модуль деформации (начальное максимальное значение модуля деформации по первичной ветви нагружения до деформации  $10^{-3}$ ), МПа;

$\sigma_{\text{дев,пр}}$  – предельное девиаторное напряжение, МПа.

Помимо степенной и гиперболической в диссертации были проанализированы экспоненциальная и логарифмическая модели аппроксимации кривой деформирования грунта. С помощью известного метода скоростных уравнений первого порядка, при описании скорости приближения касательного модуля деформации к конечному состоянию ( $E_{\text{тан}} = 0$ ) при увеличении относительной вертикальной деформации, соискателем аналитически получено экспоненциальное уравнение аппроксимации кривой деформирования:

$$\sigma_{\text{дев}} = \sigma_{\text{дев,пр}} (1 - \exp(-m_1 \varepsilon_1)) \quad (11)$$

где  $m_1 = E_{\text{упр}} / \sigma_{\text{дев,пр}}$  – скоростной коэффициент пропорциональности, равный отношению упругого модуля деформации  $E_{\text{упр}}$  и предельного девиаторного напряжения  $\sigma_{\text{дев,пр}}$ .

В качестве эксперимента также было применено скоростное уравнение второго порядка для получения логарифмического уравнения аппроксимации кривой деформирования:

$$\sigma_{\text{дев}} = \frac{\ln(1 + m_2 E_{\text{упр}} \varepsilon_1)}{m_2} \quad (12)$$

где  $m_2$  – скоростной коэффициент пропорциональности второго порядка, связь с другими параметрами не прослеживается.

Несмотря на то, что все четыре модели аппроксимации показали хорошую сходимость с экспериментальной кривой деформирования (коэффициент детерминации  $R^2 > 0,95$ ), для оперативного построения модельной кривой деформирования было решено использовать только гиперболическую (10) и экспоненциальную (11) модели, в связи с тем, что физический смысл параметров аппроксимации по степенной (9) и логарифмической (12) моделям явно не определен. Для построения кривой деформирования и по гиперболической и по экспоненциальной моделям необходимо рассчитать два параметра: упругий модуль деформации  $E_{\text{упр}}$  и предельное девиаторное напряжение  $\sigma_{\text{дев,пр}}$ .

Для оценки упругого модуля деформации  $E_{\text{упр}}$  использован штамповый модуль деформации  $E_{\text{шт}}$  (формула (8)), заданный как доля  $r$  от упругого модуля деформации:

$$E_{\text{упр}} = \frac{E_{\text{шт}}}{r} \quad (13)$$

По результатам штамповых испытаний, изложенных в Главе 2 сделан вывод о том, что параметр  $r$  принимает значения в интервале 0,59–0,86 и в большинстве случаев близок к 0,65. Поэтому предварительно для дальнейшего анализа принято  $r = 0,65$ .

Для оценки предельного девиаторного напряжения  $\sigma_{\text{дев,пр}}$ , использована зависимость, применяемая в гиперболической модели упрочняющегося грунта (Hardening Soil – HS):

$$\sigma_{\text{дев,пр}} = \frac{1}{R_f} (c \operatorname{ctg} \varphi + \sigma_3) \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}, \text{ кПа} \quad (14)$$

где  $R_f$  – критерий обрушения, обычно задается в пределах 0,6–1 и зачастую принимается равным 0,9 для гиперболической модели; для экспоненциальной модели принят равным 1,0;

$c$  – удельное сцепление, кПа;

$\varphi$  – угол внутреннего трения, град;

$\sigma_3$  – боковое давление, может быть оценено по волновому разрезу по формуле:

$$\sigma_3 = K_0 \sigma_1 = K_0 \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i, \text{ кПа} \quad (15)$$

где  $n$  – количество слоев грунтового массива;

$h_i$  – высота  $i$ -го грунтового слоя, м;

$\gamma_i$  – удельный вес  $i$ -го грунтового слоя, кН/м<sup>3</sup>, оценка по формуле (2).

$K_0$  – коэффициент бокового давления грунта в состоянии покоя по известной формуле:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (16)$$

Для оценки удельного сцепления  $c$  и угла внутреннего трения  $\varphi$  по результатам МАПВ предложены две формулы (17) и (18), составленные на основе существующих корреляционных зависимостей для территориальных районов Урала и Западной Сибири из методических рекомендаций 1985 г. под авторством О. П. Аникина:

$$c = 4,2 \cdot 10^{-10} \rho V_R^2 + 0,0087, \text{ МПа, } 0,010 \leq c \leq 0,147; R = 0,82 \quad (17)$$

$$\varphi = 45,6 - 7,6 \frac{V_P}{V_R}, \text{ град, } 11 \leq \varphi \leq 35; R = 0,92 \quad (18)$$

где  $G_{0, \text{дин}}$  – динамический модуль сдвига по формуле (1), МПа;

$R$  – коэффициент корреляции;

$V_R$  – скорость поверхностной волны, м/с, определяемая по результатам полевых исследований МАПВ;

$V_P$  – скорость продольной волны, м/с, может быть определена по результатам полевых испытаний методом КМПВ, которые могут быть выполнены следом за испытанием методом МАПВ на той же расстановке, только с использованием иных пунктов возбуждения; либо, при наличии данных о подвидах и наименованиях грунтов, слагающих разрез, рассчитана по формуле (19) по скорости поверхностной волны  $V_R$  и динамическому коэффициенту Пуассона  $\nu_{\text{дин}}$ , который может быть оценен по Прил. Г, СП 23.13330.2018:

$$V_P = 1,05 \cdot V_R \cdot \sqrt{\frac{2(1 - \nu_{\text{дин}})}{1 - 2\nu_{\text{дин}}}} \quad (19)$$

Необходимо отметить, что предложенные зависимости (17) и (18) были составлены на основе существующих корреляций для скоростей объемных волн для песчано-глинистых грунтов естественной влажности для территориальных районов Урала и Западной Сибири.

Далее выбирается предпочитаемая модель кривой деформирования  $\sigma_{\text{дев}} = f(\varepsilon_1)$ : гиперболическая (10) или экспоненциальная (11) – и выполняется графическое построение (Рисунок 3). Гиперболическая модель подходит преимущественно для неуплотненных связных грунтов, экспоненциальная модель – для несвязных и уплотненных связных грунтов. На построенной кривой с использованием оцененного модуля деформации по формуле (8) отмечается точка с координатами  $(\varepsilon_{\text{шт}}; \sigma_{\text{шт}})$  по формулам (20), (21), через которую из начала координат проводится линия аппроксимации:

$$\sigma_{\text{шт}} = r x \sigma_{\text{дев, пр}} \quad (20)$$

$$\varepsilon_{\text{шт}} = x \frac{1}{m_1} = x \frac{\sigma_{\text{дев, пр}}}{E_{\text{упр}}} \quad (21)$$

где  $x$  – коэффициент, который может быть найден из уравнений (22) или (23) для экспоненциальной и гиперболической формы кривой соответственно при заданном параметре  $r$ :

$$r = \frac{1}{x} (1 - \exp(-x)) \quad (22)$$

$$r = \frac{1}{1 + x} \quad (23)$$

При предварительно принятом параметре  $r = 0,65$  корень  $x = 0,934$  для экспоненциальной кривой или  $x = 0,538$  для гиперболической кривой.

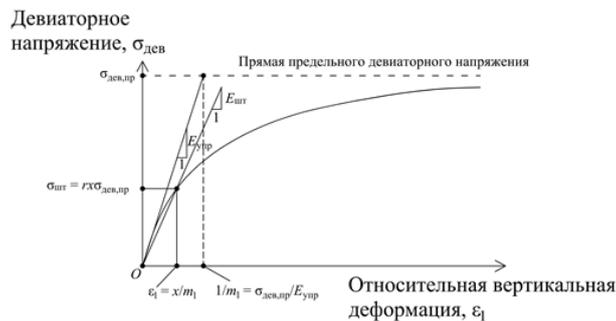


Рисунок 3 – Модельная кривая деформирования

**Глава 4 «Численное моделирование испытаний штампом с использованием модельной кривой деформирования»** содержит методику и результаты численного моделирования испытаний штампом площадью  $5000 \text{ см}^2$  грунтов в природном залегании, выполненного с применением модельных кривых деформирования грунтов, построенных по предложенному в Главе 3 алгоритму, и обосновывает 3-ое положение, выносимое на защиту.

Задачей моделирования была численная оценка модуля деформации с использованием предложенного алгоритма построения модельной кривой деформирования по физическим характеристикам грунтов. Численное моделирование было выполнено в программном комплексе «Plaxis 2D». Процедура испытаний штампом и расчет модуля деформации моделировались в соответствии с ГОСТ 20276-2012. Жесткая плита штампа принималась радиусом  $R = 0,4$  м. Геометрическая модель задавалась осесимметричной размерами  $3,0 \times 3,0$  м. Назначенные размеры приняты не менее глубины сжимаемой толщи  $H_c$ . Для учета бытового давления на глубине установки штампа из полевых испытаний в Главе 2 в модель вводилась вертикальная распределенная нагрузка по всей ширине геометрической модели. Ступени нагружения штампа подбирались согласно ГОСТ 20276-2012.

Грунты в естественном природном состоянии имеют характерный начальный участок малых деформаций, поэтому для их моделирования была

использована известная модель упрочняющегося грунта с малыми деформациями («Hardening Soil Small Strain Model»). Параметры моделей грунтов, исследованных в полевых условиях в Главе 2, оценивались с помощью предложенной в Главе 3 методики построения модельной кривой деформирования.

Итоговое сравнение модулей деформации, полученных по результатам численного моделирования, с полевыми значениями представлено в Таблице 3.

Таблица 3 – Итоговое сравнение модулей деформации по результатам численного моделирования и полевым испытаниям

Грунт	$E$ , МПа, полевой	$E_{расч}$ , МПа, по (10)	$E_{числ}$ , МПа, численный
П.Нас	26,4	15,7	14,9
П.Гл	6,8	4,4	2,0
П.Суп	9,1	9,1	8,5
П.Сугл	5,1	5,4	4,0
П.Пес	17,2	15,7	10,6

Полученные в результате численного моделирования модули деформации (Таблица 3) не превышают оцененных значений по формуле (9) и реальных полевых значений. В случае грунта П.Сугл оцененный по формуле (9) модуль деформации незначительно превысил полевое значение, но по результатам численного моделирования величина модуля деформации не превышает полевого значения. Способ предварительной оценки модуля деформации по результатам Главы 2 и способ построения модельной кривой деформирования по результатам Главы 3 позволяют проводить численное моделирование не только по результатам МАПВ, но и по физическим характеристикам песчаных и глинистых грунтов полученным по результатам стандартных инженерно-геологических изысканий, что позволяет уточнять оцениваемое значение модуля деформации в процессе предварительных расчетов оснований и фундаментов.

**Глава 5 «Практические рекомендации»** содержит практические пошаговые рекомендации для оперативной предварительной оценки модуля деформации  $E$  и построения модельной кривой деформирования песчаных и глинистых грунтов Пермского края по результатам МАПВ на этапе предпроектных работ, примеры расчета оснований по деформациям с использованием предложенных методов, сравнение предложенных методов с существующими корреляциями для скоростей объемных волн по СП 446.1325800.2019, а также технико-экономическое сравнение эффективности применения предложенного в диссертации практического метода по сравнению с испытаниями штампом, статическим зондированием и испытанием прессиомером при предварительной оценке модуля деформации. Область применения практических рекомендаций: оперативная оценка модуля деформации и построение модельной кривой деформирования по результатам многоканального

анализа поверхностных волн на этапе предпроектных работ могут выполняться для нормально уплотненных несвязных (пески) и связных (супеси, суглинки, глины) минеральных дисперсных грунтов ненарушенной структуры с удельным весом от 16,0 до 20,8 кН/м<sup>3</sup>, расположенных на территории Пермского края на глубине до 6,5 м вне криолитозоны при положительной температуре. Оцениваемый модуль деформации  $E$  будет сопоставим со штамповым модулем деформации  $E_{шт}$  для штампа площадью 5000 см<sup>2</sup>. Оцениваемый модуль деформации и модельная кривая деформирования применимы в пределах действия принципа линейной деформируемости при соответствующих давлениях.

Предложенные в рекомендациях формулы были составлены для соотношения скоростей поверхностной и сдвиговой волн  $V_R = 0,954 V_s$ , т. е. для значения динамического коэффициента Пуассона 0,49, которое соответствует водонасыщенному состоянию, что принято как запас для наиболее неблагоприятного сочетания при предварительных оперативных расчетах оснований и фундаментов на предпроектном этапе. Если динамический коэффициент Пуассона определен в процессе полевых исследований, то предложенные формулы (1), (2), (17), (18) и (19) могут быть уточнены при определенном динамическом коэффициенте Пуассона для нового соотношения скоростей поверхностной и сдвиговой волн, которое необходимо найти из известного уравнения (24):

$$\left(\frac{V_R}{V_s}\right)^6 - 8\left(\frac{V_R}{V_s}\right)^4 + 8\left(\frac{V_R}{V_s}\right)^2 \cdot \left(\frac{2 - \nu_{дин}}{1 - \nu_{дин}}\right) - \frac{8}{1 - \nu_{дин}} = 0 \quad (24)$$

Для неводонасыщенных грунтов оценку удельного веса можно осуществить по существующим корреляционным зависимостям, приведенным в методических рекомендациях О. П. Аникина. Необходимо уточнить новые зависимости для принятого соотношения скоростей поверхностной и сдвиговой волн.

Предложенный метод предварительной оперативной оценки модуля деформации песчаных и глинистых грунтов Пермского края по результатам МАПВ включает следующие этапы:

1. По результатам испытаний грунтов неразрушающим методом МАПВ получают скорости поверхностных волн  $V_R$ . При параллельной съемке методом КМПВ на той же расстановке можно получить скорости продольных волн  $V_p$ . Если скорость продольной волны при выполнении полевых работ не определялась, то она может оцениваться по формуле (19) при наличии данных о подвидах и наименованиях грунтов, слагающих разрез;

2. Оценивается удельный вес по формуле (2);
3. Рассчитывается динамический модуль сдвига  $G_{0,дин}$  по формуле (1);
4. Рассчитывается переходный коэффициент  $k_G$  по формуле (6);

5. Оценивается модуль деформации  $E_{шт}$  по формуле (8);

Предложенный метод построения модельной кривой деформирования песчаных и глинистых грунтов Пермского края по результатам МАПВ осуществляется после оценки модуля деформации:

1. Производится оценка прочностных параметров по формулам (17) и (18);

2. Выбирается форма кривой: гиперболическая или экспоненциальная. Гиперболическая модель преимущественно для неплотных связных грунтов, экспоненциальная модель – для несвязных и плотных связных грунтов;

3. Рассчитывается боковое давление  $\sigma_3$  по волновому разрезу по (15);

4. Рассчитывается предельное девиаторное напряжение  $\sigma_{дев,пр}$  по (14);

5. Задается отношение  $r$  штампового модуля деформации  $E_{шт}$  к упругому модулю деформации  $E_{упр}$  из интервала 0,59–0,86 (предварительно рекомендуется принимать значение 0,65) и по формуле (13) рассчитывается упругий модуль деформации  $E_{упр}$  при условии, что  $E_{шт} = E$ ;

6. Осуществляется графическое построение модельной кривой деформирования по выбранной модели: гиперболической (10) или экспоненциальной (11);

7. Отмечается линейная аппроксимация оцененным модулем деформации точкой с координатами  $(\epsilon_{шт}; \sigma_{шт})$ , рассчитываемыми по (21) и (20).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Многоканальный анализ поверхностных волн (МАПВ) является неразрушающим методом исследований грунтов, по результатам которого можно достаточно быстро оценить физико-механические характеристики несвязных (пески) и связных (супеси, суглинки, глины) минеральных дисперсных грунтов и обеспечить исходную информацию для выполнения предварительных расчетов оснований и фундаментов на этапе предпроектных работ. При выполнении работ методом МАПВ выполняются прямые измерения скорости поверхностных волн, что значительно упрощает интерпретацию результатов. Для выполнения работ методом МАПВ не требуется разрешение на проведение раскопок, обязательное для выполнения полевых изыскательских работ традиционными методами. Это делает МАПВ простым и доступным инструментом для инженера-геотехника.

2. По результатам МАПВ можно в короткие сроки оценить границы слоев грунтового разреза.

3. На основании сравнения результатов полевых испытаний штампом и МАПВ установлена зависимость между динамическим модулем сдвига  $G_{0,дин}$  и модулем деформации  $E$  песчаных и глинистых грунтов Пермского края через

переходный коэффициент  $k_G$ . Известные зависимости связывают динамический модуль сдвига  $G_{0,дин}$  со скоростью волны сдвига  $V_S$  и плотностью  $\rho$ , а удельный вес грунта  $\gamma$  со скоростью волны сдвига  $V_S$  и/или глубиной. В диссертации на основе этих зависимостей предложены формулы, связывающие динамический модуль сдвига  $G_{0,дин}$  и удельный вес  $\gamma$  со скоростью поверхностной волны  $V_R$  рэлеевского типа. Переходный коэффициент  $k_G$  от динамического модуля сдвига  $G_{0,дин}$  к модулю деформации  $E$  грунта зависит от удельного веса грунта  $\gamma$ . Для оценки модуля деформации  $E$  песчаных и глинистых грунтов, сопоставимого с испытаниями штампом площадью  $5000 \text{ см}^2$ , необходимы значения скорости поверхностных волн  $V_R$  и глубины, которые доступны по результатам МАПВ.

4. Предложена методика построения модельной кривой деформирования песчаных и глинистых грунтов Пермского края в пределах применения принципа линейной деформируемости. По результатам трехосных испытаний установлено, что форма экспериментальной кривой деформирования таких грунтов с высокой степенью сходимости может быть описана одной из четырех математических зависимостей: гиперболической, экспоненциальной, степенной, логарифмической. Поскольку коэффициенты степенной и логарифмической зависимостей не имеют физического смысла, для разработки приняты гиперболическая и экспоненциальная модели. Для построения кривой требуются модуль деформации  $E$ , угол внутреннего трения  $\phi$ , удельное сцепление  $c$  и упругий модуль деформации  $E_{упр}$ , значения которых можно оценить по результатам МАПВ. Построенная кривая применяется для выполнения предварительных расчетов оснований и фундаментов аналитическим и численным методами.

5. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния основания с использованием модельной кривой деформирования позволяет оценить значение модуля деформации  $E$  по физическим характеристикам песчаных и глинистых грунтов Пермского края. Численное моделирование с помощью модельной кривой деформирования может быть выполнено с использованием модели Мора-Кулона, моделей упрочняющегося грунта и упрочняющегося грунта с малыми деформациями, пользовательских моделей.

6. Разработаны практические рекомендации для предварительной оперативной оценки модуля деформации  $E$  и построения модельной кривой деформирования по результатам полевых испытаний методом МАПВ на этапе предпроектных работ для нормально уплотненных несвязных (пески) и связных (супеси, суглинки, глины) минеральных дисперсных грунтов ненарушенной структуры с удельным весом от  $16,0$  до  $20,8 \text{ кН/м}^3$ , расположенных на территории Пермского края на глубине до  $6,5 \text{ м}$  вне криолитозоны при положительной температуре.

**Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:** совершенствование неразрушающих методов экспресс-оценок физико-механических характеристик грунтов для предварительных расчетов оснований фундаментов в различных грунтовых условиях на территории Российской Федерации.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в изданиях, включенных 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:**

1. Антипов, В. В. Оперативное построение модельной кривой деформирования по данным волнового анализа / В. В. Антипов, В. Г. Оффрихтер, Н. Н. Лихачева // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 3 (80). – С. 101–107.

2. Антипов, В. В. Оперативная оценка напластования и удельного веса грунтов волновым методом / В. В. Антипов, В. Г. Оффрихтер // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 10, № 1. – С. 38–48.

3. Антипов, В. В. Развитие неразрушающих методов предварительной геотехнической оценки грунтовых оснований / В. В. Антипов, В. Г. Оффрихтер // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, № 12 (123). – С. 1448–1473.

**Статьи, опубликованные в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science:**

4. Antipov, V. V. Transition factor between elastic and deformation moduli for dispersive soils / V. V. Antipov, V. G. Ofrikhter // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – No. 99(7). – 9 p.

5. Antipov, V. V. Correlation Between Wave Analysis Data and Data of Plate Load Tests in Various Soils / V. V. Antipov, V. G. Ofrikhter // Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations - Proceedings of the International Conference on Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations, GFAC 2019. – London : Taylor & Francis Group, 2019. – P. 16–20.

6. Antipov, V. V. Field Estimation of Deformation Modulus of the Soils by Multichannel Analysis of Surface Waves / V. V. Antipov, V. G. Ofrikhter // Data in Brief. – 2019. – Vol. 24. – 5 p.

**Публикации в других изданиях:**

7. Антипов, В. В. Оперативная оценка модуля деформации дисперсных грунтов по результатам полевого анализа поверхностных волн // XVIII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов : тезисы докладов. – Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский горный университет, 2020. – С. 179.

8. Антипов, В. В. Определение коэффициента перехода от модуля упругости к модулю деформации грунта / В. В. Антипов, В. Г. Офрихтер // Материалы научно-технической конференции с иностранным участием «Нелинейная механика грунтов и численные методы расчетов в геотехнике и фундаментостроении», Воронеж, 6–8 ноября 2019 г. – Воронеж : Издательство ВГТУ, 2019. – С. 140–148.

9. Антипов, В. В. Обзор возможностей современных неразрушающих методов сейсморазведки в области геотехники / В. В. Антипов, В. Г. Офрихтер // Строительство и архитектура. – 2018. – Т. 6, № 1. – С. 14–18.

10. Антипов, В. В. Современные неразрушающие методы исследования верхней части разреза / В. В. Антипов, В. Г. Офрихтер // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении : Материалы международной научно-технической конференции «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении», Новочеркасск, 29–31 мая 2018 г. – Новочеркасск : ООО «Лик», 2018. – С. 477–484.

**Объекты интеллектуальной собственности:**

11. Пат. 2728739 Российская Федерация, МПК E 02 D 1/02. Способ построения кривой деформирования грунта / Офрихтер В. Г., Антипов В. В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». – № 2020106566 ; заявл. 2020.02.11, опубл. 2020.07.30, Бюл. № 22. – 3 с.

12. Пат. 2704074 Российская Федерация, МПК E 02 D 1/00. Способ оценки модуля деформации грунта / Офрихтер В. Г., Антипов В. В.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». – № 2019103754 ; заявл. 2019.02.11 ; опубл. 2019.10.22, Бюл. № 30. – 12 с.