

## **ОТЗЫВ**

**по автореферату диссертации**

**«Неразрушающий метод оперативной оценки модуля деформации песчаных и глинистых грунтов пермского края для предварительных расчетов оснований и фундаментов», представленной Антиповым В.В. на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.02**

**Актуальность темы.** В настоящее время исходные данные для геотехнических расчетов по результатам полевых исследований предоставляются на основе результатов испытаний традиционными методами: бурение и отбор проб, зондирование, испытания штампами, испытания прессиометром, дилатометром и др., для которых характерны значительная стоимость, временные и трудовые затраты.

Уже на этапе предпроектных работ возникает потребность в развитии и использовании недорогих оперативных неразрушающих методов, позволяющих в короткий период времени выполнить предварительную геотехническую оценку ситуации на исследуемой площадке. Среди них – метод многоканального анализа поверхностных волн (англ. – 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 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.

### **ПОЛОЖЕНИЯ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

#### **Первое защищаемое положение**

**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.**

В главе рассматривается состояние вопроса связи упругих и общих характеристик деформирования, что 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). В работе рассматриваются несвязные (пески) и связные (супеси, суглинки, глины) минеральные дисперсные грунты. Метод 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 перестановки пары приемников и значительно снижает трудоемкость работ по сравнению с другими волновыми методами (известные как КМПВ, МОВ, САПВ и др.). 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.

## Второе защищаемое положение

**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.**

В полевых условиях 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> по ГОСТ 20276-2012, выполненные ЦТИМС «МИКС» ПНИПУ и ОАО «ВерхнекамТИСИЗ».

По результатам МАПВ строились волновые разрезы, значения динамического модуля сдвига  $G_{0,дин}$  и оценивались значения удельного веса  $\gamma$ . Также выполнялось сравнение скоростных профилей по результатам МАПВ с геологическими колонками. По результатам испытаний штампами определялись модули деформации для двух интервалов нагрузок: интервал нагрузок для первых четырех точек графиков  $S = f(P)$  по ГОСТу 20276 и общий интервал 50–125 МПа.

По результатам МАПВ рассчитывались:

1) Динамический модуль сдвига по результатам МАПВ рассчитывался по формуле теории упругости Р. В. Мауне для скорости поверхностной волны.

2) Плотность (удельный вес) рассчитывается на основе зависимости для скорости сдвиговой волны для водонасыщенных грунтов.

Значения динамического модуля сдвига по методу МАПВ сопоставлялись со значениями модулей деформации из испытаний штампами площадью 5000 см<sup>2</sup> (с корректировкой размера штампа по СП 23) для двух интервалов нагружения: по ГОСТ 20276 и интервала 50–125 кПа.

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

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

Таблица 1 – Расчет переходных коэффициентов  $k_G$

Грунт	$\gamma$ , кН/м <sup>3</sup>	$G_{0,дин}$ , МПа	$E_{5000}$ , МПа	$E'_{5000}$ , МПа	$k_G$	$k'_G$
Песок	15,974	32,0	17,2	16,9	0,538	0,529
Насыпной	17,836	111,7	26,4	26,0	0,236	0,233
Суглинок	18,424	26,4	5,1	5,1	0,193	0,193
Супесь	19,796	60,0	9,1	9,1	0,152	0,152
Глина	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  $\gamma$ . 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, которые были получены в результате применения известного метода R. L. Handy.

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:

$$E = k_G G_{0,дин},$$

где  $k_G$  – переходный коэффициент по табл. 1;

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

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, выполненных ООО «Новосибирский инженерный центр».

Лабораторные испытания грунтов на трехосное сжатие выполнялись на установке трехосного сжатия А ГТ 2.3.8.производства ООО «НПП Геотек» (г. Пенза), максимальная нагрузка 1 т (10 кН).

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.

### Третье защищаемое положение

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

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.

Кривые деформирования, получаемые по результатам лабораторных испытаний грунтов на трехосное сжатие, часто аппроксимируют с помощью различных моделей  $\sigma_{\text{дев}} = f(\epsilon_1)$ . Наиболее распространенными моделями аппроксимации являются степенная и гиперболическая.

Несмотря на то, что все четыре модели аппроксимации показали хорошую сходимость с экспериментальной кривой деформирования, для оперативного построения модельной кривой деформирования было решено использовать только гиперболическую и экспоненциальную модели. 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  $E_{\text{шт}}$ , заданный как доля  $r$  от упругого модуля деформации:

$$E_{\text{упр}} = \frac{E_{\text{шт}}}{r}.$$

По результатам штамповых испытаний делается вывод о том, что параметр  $r$  принимает значения в интервале 0,59–0,86; для дальнейшего анализа принято  $r = 0,65$ .

Задачей численного 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. Ступени нагружения штампа подбирались согласно ГОСТ 20276-2012.

Итоговое сравнение модулей деформации, полученных по результатам численного моделирования, с полевыми значениями представлено в Табл. 2.

Таблица 2 – Итоговое сравнение модулей деформации по результатам численного моделирования и полевым испытаниям

Грунт	E, МПа, полевой	E <sub>расч.</sub> МПа	E <sub>числ.</sub> МПа
Насыпной	26.4	15.7	14.9
Глина	6.8	4.4	2.0
Супесь	9.1	9.1	8.5
Суглинок	5.1	5.4	4.0
Песок	17.2	15.7	10.6

Полученные в результате численного моделирования модули деформации (Таблица 2) не превышают реальных полевых значений.

Таким образом способ предварительной оценки модуля деформации и способ построения модельной кривой деформирования позволяют проводить численное моделирование не только по результатам МАПВ, но и по физическим характеристикам песчаных и глинистых грунтов

### Публикации по теме диссертации

Основные результаты и положения работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: Международных научно-технических конференциях СПбПУ, 2019 и 2020 гг., Воронеж, ВГТУ, 2019 г., Пермь, ПНИПУ, 2019 г. и др.

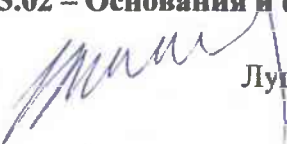
По теме диссертации опубликовано лично или в соавторстве 12 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, включенных в «Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук», 3 работы опубликованы в журналах, индексируемых в реферативных базах Scopus и Web of Science; получено 2 патента на изобретение.

**Замечание:** следовало бы отметить другие методы экспертной оценки характеристик грунтов, пусть даже имеющие меньшие метрологические возможности (например, Плотномер).

### ОБЩИЙ ВЫВОД

Диссертационная работа представляет собой законченное исследование, имеющее важное научное и практическое значение. Диссертант Антипов Вадим Валерьевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения.

Подпись:  
30.08.2021



Лушников В.В.

Лушников Владимир Вениаминович, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки России

Профессор-консультант кафедры Геотехники Санкт-Петербургского Государственного Архитектурно Строительного Университета

