ООО «ГЕОМАРКЕТИНГ»
ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве»
АССОЦИАЦИЯ «ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ» – Общероссийское
отраслевое объединение работодателей
СОЮЗ ИЗЫСКАТЕЛЕЙ

Общероссийская научно-практическая
конференция и выставка

**«ПОЛЕВЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУНТОВ –
ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ»**

МАТЕРИАЛЫ

21 мая 2021 г.

г. Москва
2021

ООО «ГЕОМАРКЕТИНГ»
ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве»
АССОЦИАЦИЯ «ИНЖЕНЕРНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ» – Общероссийское
отраслевое объединение работодателей
СОЮЗ ИЗЫСКАТЕЛЕЙ

Общероссийская научно-практическая конференция и выставка
«ПОЛЕВЫЕ И ЛАБОРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРУНТОВ –
ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ»

МАТЕРИАЛЫ

21 мая 2021 г.

г. Москва
2021

GEOMARKETING LLC
Russian Geotechnical Institute LLC
RUSSIAN GEOTECHNICAL ASSOCIATION
THE UNION OF PROSPECTORS

All-Russian scientific and practical Conference and Exhibition
«FIELD AND LABORATORY METHODS OF SOIL INVESTIGATIONS –
PROBLEMS AND SOLUTIONS»

MATERIALS

21 May 2021

Moscow
2021

Материалы Общероссийской научно-практической конференции и выставки
«Полевые и лабораторные методы исследования грунтов – проблемы и решения»,
г. Москва, 21 мая 2021 г.

Полевые и лабораторные методы исследования грунтов – проблемы и решения (Материалы Общероссийской научно-практической конференции и выставки).
М.: ООО «Геомаркетинг». 2021. – 141 с.

21 мая 2021 г. в бизнес-отеле «Бородино» (г. Москва) редакцией журнала «Инженерные изыскания» совместно с ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве» (ООО «ИГИИС»), Ассоциацией «Инженерные изыскания в строительстве» – Общероссийское отраслевое объединение работодателей («АИИС») и Союзом изыскателей была проведена Общероссийская научно-практическая конференция и выставка **«Полевые и лабораторные методы исследования грунтов – проблемы и решения»**.

В конференции приняли участие 74 представителя из различных проектно-изыскательских организаций, научно-исследовательских институтов, крупнейших производственных организаций и вузов (всего 31 организация) из восьми городов РФ: Москва, Санкт-Петербург, Ижевск, Казань, Краснодар, Пенза, Темрюк, Хабаровск. Заслушано 16 докладов.

В материалах докладов Общероссийской научно-практической конференции и выставки **«Полевые и лабораторные методы исследования грунтов – проблемы и решения»** представлены публикации по различным аспектам полевых и лабораторных исследований грунтов, инженерно-геологическим изысканиям и проектированию.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов в области грунтоведения, механики грунтов, инженерно-геологических изысканий, проектирования, строительства, для студентов и аспирантов профильных вузов.

ISBN 978-5-6040982-6-4

<https://doi.org/10.25296/978-5-6040982-6-4-2021-5-1-141>

Редакционная группа: Журавлева Н.А., Висхаджиева К.С.

Materials of the All-Russian scientific and practical Conference and Exhibition
“Field and laboratory methods of soil investigations – problems and solutions”,
Moscow, 21 May 2021

Field and laboratory methods of soil investigations – problems and solutions (Materials of the All-Russian scientific and practical Conference and Exhibition).
Moscow: Geomarketing LLC. 2021. – 141 p.

On 21 May 2021 editorial board of the Engineering Survey journal in conjunction with the Russian Geotechnical Institute LLC, Russian Geotechnical Association, and the Union of Prospectors held online All-Russian scientific and practical Conference and Exhibition **“Field and laboratory methods of soil investigations – problems and solutions”** (Moscow).

The conference was attended by 74 representatives of 31 design and survey organizations, research institutes, major production organisations, and universities from 8 cities of the Russian Federation: Moscow, Saint Petersburg, Izhevsk, Kazan, Krasnodar, Penza, Temryuk, Khabarovsk. 16 reports were presented.

In the materials of the All-Russian scientific and practical Conference and Exhibition **“Field and laboratory methods of soil investigations – problems and solutions”** there are presented publications on various aspects of field and laboratory investigations of soils, engineering-geological surveys, and design.

Materials are intended for a wide range of specialists in the field of soil science, soil mechanics, engineering-geological surveys, design, construction, for students and graduate students of specialized universities.

ISBN 978-5-6040982-6-4

<https://doi.org/10.25296/978-5-6040982-6-4-2021-5-1-141>

Editorial group: N.A. Zhuravleva, K.S. Viskhadzhieva

СОДЕРЖАНИЕ

Королев М.В.

Институт прикладной механики РАН
НИУ МГСУ

**Вопросы методологии совершенствования
геомеханических испытаний**

9

Локтев А.С.

ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова»

Вознесенский Е.А.

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН
МГУ имени М.В. Ломоносова

**Испытание грунтов шельфа статическим зондированием.
Требования и практика**

69

Горобцов Д.Н., Фоменко И.К., Кургузов К.В., Новгородова М.А.

РГГРУ имени Серго Орджоникидзе (МГРИ)

Сироткина О.Н.

МГУ имени М.В. Ломоносова

Интерпретация данных статического зондирования грунтов

75

Мирный А.Ю.

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Определение модуля деформации по результатам испытаний
трехосного сжатия в соответствии с ГОСТ 12248.3-2020**

83

Лехов М.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Опытные откачки в изысканиях: неопределенность
и неоднозначность**

90

Исаев О.Н.

НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ “Строительство”»

**Статическое зондирование грунта зондом с датчиками бокового
и порового давлений**

98

Козлов А.В.

ООО «Автодор-Инжиниринг»

**Опыт ООО «Автодор-Инжиниринг» по контролю качества
проведения инженерных изысканий на объектах государственной
компаний «Автодор»**

105

Зюзин Р.С., Гуров А.С., Вавилова В.К.

АО «Институт Гидропроект» – филиал ЦСГНЭО

**К вопросу о роли крупномасштабных сдвиговых опытов
в назначении расчетных геомеханических характеристик**

117

Матвеев В.В., Фадеев Е.А., Шевцов М.О.

ООО «ГеоГрадСтрой»

Шанина В.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова

**Оценка точности различных методов определения напряжения
предуплотнения (на примере глинистых грунтов г. Москвы)**

124

Никитин С.Н.

ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН

**Применение вертикального сейсмического профилирования
для сейсмического микрорайонирования**

133

CONTENTS

Korolev M.V.

Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences
Moscow State (National Research) University of Civil Engineering

Methodological issues for improving geomechanical testing 9

Loktev A.S.

Lomonosov Moscow State University Marine Research Center LLC

Voznesensky E.A.

Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences
Lomonosov Moscow State University

Cone penetration test of offshore soils. Requirements and practice 69

Gorobtsov D.N., Fomenko I.K., Kurguzov K.V., Novgorodova M.A.

Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI)

Sirotkina O.N.

Lomonosov Moscow State University

Interpretation of data of soil cone penetration testing 75

Mirnyy A.Yu.

Lomonosov Moscow State University

**Determination of the deformation modulus based on the results
of triaxial compression tests in accordance with GOST 12248.3-2020** 83

Lekhov M.V.

Lomonosov Moscow State University

Well pumping tests for engineering survey: uncertainty and ambiguity 90

Isaev O.N.

Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP),
Research Center of Construction JSC

Cone penetration test of soils using lateral and pore pressure sensors 98

Kozlov A.V.

Avtodor-Inzhiniring LLC

**Experience of Avtodor-Inzhiniring LLC in quality control
of engineering surveys at the facilities of the state company “Russian
Highways”** 105

Zyuzin R.S., Gurov A.S., Vavilova V.K.

Branch of the Institute Hydroproject JSC – Service Center for Geodynamic
Observations in the Power Industry

**On the role of large-scale shear tests in the design geomechanical
characteristics assignment**

117

Matveev V.V., Fadeev E.A., Shevtsov M.O.

GeoGradStroy LLC

Shanina V.V.

Lomonosov Moscow State University

**Assessment of the accuracy of measurement methods for interpretation
of preconsolidation pressure (a study of the clay soils in Moscow)**

124

Nikitin S.N.

Shmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences

Application of vertical seismic profiling for seismic microzoning

133

Королев М.В.

Институт прикладной механики РАН, лаборатория геомеханики; НИУ МГСУ, базовая кафедра прикладной геомеханики, г. Москва, m-korolev2009@yandex.ru

ВОПРОСЫ МЕТОДОЛОГИИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Аннотация. Данная публикация (в трех частях) посвящена вопросам методологии совершенствования геомеханических испытаний. **В первой части** рассматриваются новые актуальные «вызовы», стоящие перед строительным комплексом РФ и показывается, что известные к настоящему времени методы геомеханических испытаний не в состоянии эффективно выполнить огромный объем исследований, необходимых для решения новых возникших задач. **Во второй части** рассматриваются вопросы методологии совершенствования методов геомеханических испытаний, основными элементами которой являются анализ тенденций в совершенствовании методов, использование при создании и совершенствовании новых методов общих законов эволюции технических систем; использование при разработках и совершенствовании методов и алгоритмов системного анализа; необходимость принятия единой терминологии и единой классификации методов геомеханических испытаний; использование при совершенствовании и разработке новых методов геомеханических испытаний принципа рационального баланса между их стоимостью и точностью, синхронизация элементов системы «изыскания – геомеханические расчеты – проектирование»; включение в состав геомеханических изыскательских комплексов расчетных методов и вариационных расчетов для оптимизации программы исследований. **В третьей части** приводятся некоторые примеры принципиально новых методик и способов испытаний, разработанных с использованием предлагаемых основ методологии, которые по сравнению с существующими обладают значительно большей информативностью и эффективностью и которые в отличие от известных методов могут позволить справиться с новыми «вызовами».

Ключевые слова: геомеханические испытания; деградация мерзлоты; запасы пресной воды; рост мегаполисов; методология; метод; способ; методика; модель; схема; установка; классификация методов; законы эволюции систем; системный анализ; стоимость и точность испытаний; системные целенаправленные инновации; ползуче-релаксационный режим нагружения; методики испытаний при различных температурах; мобильная многоцелевая установка; расчетные комплексы.

Часть 1. Современные вызовы, требующие пересмотра подходов к геомеханическим испытаниям

Если рассматривать инновации в области совершенствования методов геомеханических испытаний как раздел (часть) геомеханики, то для ее системного развития нужно иметь свою методологию – научно обоснованную систему базовых принципов, методов и приемов. Одним из таких базисных принципов является анализ эволюции методов изучения механических свойств грунтов, поиск закономерностей и прогнозирование направлений развития на основе изучения основных трендов.

В настоящее время основными трендами совершенствования геомеханических испытаний являются: автоматизация процесса испытаний, попытка повышения информативности экспериментов за счет оснащения приборов и установок дополнительными измерительными и вспомогательными устройствами, датчиками и др., стремление к отказу от методов, связанных с трудоемкими подготовительными работами, к повышению технологичности полевых и лабораторных экспериментов, стремление к созданию multifunctional установок и приборов.

Вместе с тем в настоящее время принципиально новые методы геомеханических исследований практически не разрабатываются, модернизация осуществляется достаточно медленно и в рамках научных основ, разработанных еще в середине XX в. Разработки осуществляются, как правило, точечно, бессистемно и без опоры на научно обоснованную методологию инноваций.

Как показывает анализ, история становления геомеханики, появление новых методов геомеханических испытаний тесно связаны с появлением новых «вызовов» и новых задач. То есть бурно новые методы и направления развиваются только тогда, когда старыми известными методами возникающие новые задачи решить невозможно.

Для того чтобы разработать систему базисных принципов в области дальнейшего целенаправленного совершенствования геомеханических испытаний на данном этапе (т.е. рассмотреть и уточнить вопросы методологии инноваций) целесообразно сначала рассмотреть новые актуальные проблемы, глобальные «вызовы» и те возникающие проблемы, которые не могут быть решены в рамках известных методов геомеханических исследований. Это поможет определить требования к будущим разработкам в этой области, а эти требования, в свою очередь, помогут уточнить и дополнить совокупность общих подходов и систему базисных принципов (т.е. методологию) к инновациям в этой сфере.

Новые «вызовы», проблемы и актуальные задачи, которые стоят в настоящее время перед геомеханическими испытаниями и которые невозможно эффективно решить существующими методами

«Вызов» № 1. Системные проблемы геомеханических испытаний в криолитозоне.

Свойства мерзлых грунтов

Многолетнемерзлые грунты обладают рядом специфических свойств, **которые существенно осложняют проведение геомеханических испытаний, строительство и эксплуатацию объектов [6]:**

– обладают значительной изменчивостью и неоднородностью в плане и по глубине;

- очень разнообразны по генезису, составу и строению. Могут быть масштабно неоднородны (трещиноватые скальные грунты);
- их механические свойства существенно зависят от влажности, засоленности, текстуры, наличия включений, степени сохранности;
- механические свойства очень сильно зависят от значения отрицательных температур. Многие мерзлые грунты являются структурно неустойчивыми. При растеплении теряют несущую способность и претерпевают просадки;
- обладают ярко выраженными реологическими свойствами – значительными деформациями ползучести, релаксацией напряжений, существенным снижением прочности во времени.

Существующие способы и методики геомеханических испытаний таких грунтов обладают малой информативностью, высокой трудоемкостью, низкой эффективностью и мало пригодны для массового использования. Для определения механических свойств требуется проведение большого количества опытов (при разных значениях отрицательных температур), значительная длительность экспериментов, что встречает дополнительные технические сложности при проведении экспериментов.

Потепление климата и деградация мерзлоты

В Северном полушарии зафиксировано потепление климата и процесс деградации мерзлоты. Глобальный тренд температуры воздуха на Земле за последнее столетие составил $0,6\text{--}0,8^{\circ}\text{C}/100$ лет. Тренд изменения температуры в криолитозоне России в 1979–2017 гг. составил в среднем $0,47^{\circ}\text{C}/10$ лет, что в 2,5 раза выше среднего глобального тренда за это время (рис. 1). По расчетным прогнозам климатологов, значения температур будут в дальнейшем повышаться. Средний тренд приземной температуры атмосферы составляет $0,02\text{--}0,07^{\circ}\text{C}/\text{год}$.

С потеплением климата, деградацией мерзлоты, изменением температуры массивов многолетнемерзлых грунтов возникают значительные негативные последствия.

Масштабы проблемы

В России 63% территории занимают многолетнемерзлые грунты ($10,7$ млн км²).

На рис. 2 представлена карта распространения многолетнемерзлых грунтов на территории РФ.

Около 75% зданий и сооружений в РФ построены по принципу сохранения многолетней мерзлоты, в т.ч. на сваях с высоким ростверком и вентилируемым подпольем. Увеличение температуры грунтового основания всего на $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$ резко снижает несущую способность свай (до 50%).

Негативные последствия

Растепление массива и термические просадки мерзлых грунтов при оттаивании вызывают дополнительные неравномерные недопустимые осадки зданий, сооружений, дорог, трубопроводов, опор мостов, мачт, также происходит разрушение берегов рек и морей, образование термокарста, заболачивание территорий, образование газогидратных воронок (рис. 3). При

добыче нефти и газа с большой глубины происходит растепление грунта вокруг добывающей скважины, что может привести к потере ее устойчивости (см. рис. 3).

Рис. 1. Динамика среднегодовой температуры воздуха на территории России по данным Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (а). Карта деградации мерзлоты и зон риска для инженерных сооружений (б).

Обозначения: 1 – регионы, в которых изменения мерзлоты не приводят к качественным изменениям; 2 – регионы с начинающейся деградацией мерзлоты и снижающейся несущей способностью оснований и фундаментов; 3 – регионы, в которых происходит активная деградация мерзлоты и опускание ее кровли. Крупные города находятся в зоне риска, возможны недопустимые деформации и разрушения сооружений; 4 – области вне криолитозоны. Составлено по данным: Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Института криосферы Земли СО РАН, Тюменского государственного университета, Института геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Пущинского научного центра РАН, Коми научного центра УрО РАН

Рис. 2. Многолетняя мерзлота в России: пространственное распределение, льдистость, температура на глубине нулевых годовых амплитуд

Рис. 3. Примеры негативных последствий в результате термической просадки многолетнемерзлых грунтов основания: а – разрушение домов, б – разрушение дорог; в, г – разрушение трубопроводов; д, е – оттаивание грунтов вокруг нефте- и газодобывающих скважин с потерей устойчивости; ж – обрушение берегов; з – образование термокарста и заболачивания (Интернет-источники)

По данным МЧС России в Западной Сибири ежегодно фиксируется 35 тыс. отказов нефте- и газопроводов и это количество возрастает. В г. Тюмени из-за

аварий нефтепроводов ежегодно разливается 10 тыс. т нефти. Число природных катастроф, связанных с изменением климата, ущербом более 1% ВВП страны с 1963 по 1992 гг. возросло в 4 раза. Общий ущерб от природных и техногенных катастроф за этот период составил 340 млрд долл. США.

В связи с изменением температуры многие объекты существующей инфраструктуры российского Севера находятся в зоне риска. Так, например, в г. Якутске за последние 30 лет были разрушены и повреждены 300 зданий (см. рис. 3).

С учетом сложности, длительности и необходимости проведения большого количества испытаний существующие методы геомеханических исследований не позволяют эффективно справиться с таким «вызовом», как обеспечение массовых испытаний грунтов для оценки состояния оснований существующих и проектируемых сооружений в условиях изменения температурного режима массива.

Пример несовершенства существующих норм и применяемых методов геомеханических испытаний

Первый пример, когда существующие методы, способы и методики испытаний не смогли обеспечить надежное определение механических характеристик для проектирования объекта. При геомеханических испытаниях мерзлых масштабно неоднородных грунтов, слагающих борта откосов строительного котлована Вилуйской ГЭС-3 для обоснования их устойчивости изыскатели столкнулись со следующей проблемой. Откосы котлованов были сложены из грунтов шести различных инженерно-геологических элементов (ИГЭ), каждый из которых имел три выделяемые зоны сохранности и три температурные зоны (рис. 4).

а б

Рис. 4. Створ Вилюйской ГЭС-3 (а). Схема иерархических типовых структур массива левого берега р. Вилюй в створе проектируемого гидроузла (б)

При проведении исследований стандартными методиками требовалось бы провести следующее количество испытаний:

$$N = a \cdot b \cdot c \cdot d, \quad (1)$$

где N – требуемое общее количество испытаний; $a = 6$ – количество ИГЭ; $b = 3$ – количество выделенных зон трещиноватости; $c = 3$ – количество выделенных температурных зон; $d = 6$ – количество испытаний, необходимых для статистической обработки.

Из расчета следует, что общее минимальное число испытаний длительных крупномасштабных испытаний должно было составить 324.

Поскольку грунты являлись масштабно неоднородными и обладали существенными реологическими свойствами, для определения необходимых параметров длительной прочности известными методами по стандартным методикам с использованием действующих норм потребовалось бы огромное число длительных крупномасштабных испытаний, что невозможно было осуществить на практике.

Второй пример, когда из-за отсутствия надежных методов геомеханических испытаний и ошибок при проектировании произошла крупная авария на резервном хранилище дизельного топлива № 5 ТЭЦ-3 ПАО «Норильский никель» (далее «Норникель»), которая возникла в результате неправильной оценки механических свойств оттаивающих грунтов.

Опыт расследования аварий разных сооружений показывает, что ошибки, допущенные на разных стадиях жизненного цикла объекта (при инженерных изысканиях, проектировании, строительстве, экспертизе и обследовании, реконструкции и эксплуатации) могут накапливаться. Значительную роль играют недочеты и ошибки, допускаемые при сборе информации для проектирования, т.е. ошибки на стадии инженерных изысканий.

29 мая 2020 г. на хранилище № 5 дизельного топлива предприятия «Норникель» в г. Норильске произошла крупная авария (рис. 5), возникшая в резервуарном парке опасного производственного объекта «Топливное хозяйство ТЭЦ-3» АО «НТЭК». На момент аварии 29.05.2020 в резервуаре находилось 21163,3 т (25324,566 м³) дизельного топлива. В результате внезапной осадки (просадки) части свай и разрушения вследствие этого конструкции ростверка хранилища произошел разлив дизельного топлива. Стремительное самопроизвольное опорожнение хранилища через разрушенный ростверк и металлическое днище вызвало волну, в результате чего дизельное топливо перехлестнулось через защитную дамбу обвалования, и нефтепродукты попали в водотоки и грунт.

Рис. 5. Общий вид хранилища дизельного топлива. Источник: <https://www.ria.ru>

Река Амбарная, в которую попало 15 тыс. т нефтепродуктов, снабжает водой жителей района Кайеркан г. Норильска, питает оз. и р. Пясино, и впадает в Карское море. Эта авария нанесла экологии региона существенный ущерб.

Инженерно-геологическое строение массива: насыпные грунты, суглинки с включением щебня и глыб габбро-долеритов. Габбро-долериты различной степени сохранности – монолитные, трещиноватые, сильновыветрелые до состояния щебня. Кровля дочетвертичных толщ неровная, с уклоном (рис. 6).

а

б

Рис. 6. Инженерно-геологическое строение массива грунтов основания: а – разрез, б – колонка

Проектирующая организация приняла решение по устройству свайного фундамента с опиранием свай на габбро-долериты (расчетная схема – сваи стойки) с допущением оттаивания грунтов в процессе эксплуатации. При этом большинство свай опиралась на прочные монолитные грунты, а часть на сильно выветрелые (рис. 7). Однако проектировщики не учли, что при оттаивании у трещиноватых и выветрелых габбро-долеритов существенно снижаются прочностные и деформационные характеристики. Мерзлотные исследования,

проведенные после аварии, показали, что значения отрицательных температур в ряде мест значительно изменились по сравнению с первоначальными.

Рис. 7. Схематичный разрез по оси сооружения с границей мерзлоты. Составлена по результатам Большой Норильской экспедиции РАН, 2020 г.

Выполненные Институтом прикладной механики РАН (далее – ИПРИМ РАН) проверочные расчеты показали сильную неравномерность как в напряжениях, так и в перемещениях конструкции. Внешний контур является более жестким и менее напряженным, чем внутренняя часть. Максимальные напряжения в сваях-стойках, расположенных по кольцевому контуру, составляют 5,7 МПа. Максимальные напряжения в стойках, расположенных ближе к центру плиты, составляют 22,0 МПа. Это свидетельствует о том, что фундаменты были запроектированы нерационально, центральные сваи нагружены значительно больше периферийных. Это во многом предопределило аварию и привело к осадкам наиболее нагруженных свай ближе к центру ростверка, которые опирались на более слабые трещиноватые скальные грунты. Расчетное напряженно-деформированное состояние (НДС) соответствует форме фактического разрушения ростверка (рис. 8).

а

б

Рис. 8. Деформированное состояние и напряжения по Мизесу (а); фотография разрушения ростверка(б), характер разрушения которого подтверждает справедливость расчетной модели

В результате опирания части свай на выветрелые скальные грунты и их растепления – часть свай оказалась перегружена и выключилась из работы (рис. 9).

Рис. 9. Схема опирания свай на выветрелые габбро-долериты (а) и фотографии кернов при бурении через тело разрушенных свай (б). Обозначения: 1 – ростверк, 2 – свая-стойка; 3 – вентилируемое подполье; 4 – насыпные грунты и мерзлые суглинки со щебнем; 5 – габбро-долериты, в верхней части местами сильно выветрелые и трещиноватые (7)

При численном моделировании в расчетной модели удалялась сначала одна, а затем три рядом стоящие свай-стойки. Таким образом, моделировался случай, в котором одна или несколько из свай-стоек перестали работать. Анализировалось НДС в стойках, находящихся рядом с удаленными (рис. 10, 11).

По сравнению с предыдущим расчетным случаем наблюдается значительное увеличение уровня напряжений в сваях, стоящих рядом с удаленной (см. рис. 11). Максимальные напряжения по Мизесу в зоне их соединения с плитой достигают 36,7 МПа, что превышает допустимые напряжения для материала плиты. Таким образом, потеря несущей способности одной из свай-стоек приводит к прогрессивному разрушению конструкции. (рис. 12). Схема дальнейшего развития аварийной ситуации показана на рис. 13.

Рис. 10. Расположение удаленной свай (а). Деформированное состояние и поле напряжений по Мизесу (б)

Рис. 11. Вертикальные перемещения ростверка на модели (а) и фотография провала ростверка в месте, предсказанном расчетами (б)

Рис. 12. Схема, иллюстрирующая стадии разрушения и утечки дизельного топлива.
Обозначения: 1 – металлический резервуар; 2 – дизельное топливо (2а – в резервуаре до разрушения; 2б – после разрушения и попадания в подполье резервуара; 2г – прорыв дизельного топлива из внутреннего пространства подполья под напором с образованием волны, перехлестнувшей через наклонную дамбу обвалования); 3 – ростверк (3а – до разрушения; 3б – после разрушения); 4 – грунтовое обвалование, покрытое металлическими листами снаружи, ограждающее подполье (4а – до разрушения и размыва, 4б – после разрушения и размыва); 5 – сваи; 6 – скальное основание; 7 – уровень сезонного оттаивания-промерзания грунта

Рис. 13. Разрушение конструкции ростверка и оголовков свай

Главная причина аварии – неправильная оценка механических свойств выветрелого скального грунта при растеплении. Но методы надежного определения деформационных свойств таких масштабно неоднородных мерзлых и оттаивающих скальных грунтов, залегающих на глубине, к настоящему времени пока не разработаны. Поэтому изыскатели назначили допустимое давление на трещиноватые габбро-долериты по справочной литературе (175 МПа). Сооружение простояло 35 лет, но после изменения температуры массива, несущая способность свай и деформационные характеристики существенно уменьшились. Расчеты эффективных характеристик трещиноватой скалы по методикам ИПРИМ РАН это полностью подтвердили.

Выводы к «вызову» 1

Таким образом, очевидно, что подходы к проведению геомеханических испытаний для сложных объектов в криолитозоне с учетом новых «вызовов» должны быть пересмотрены, что должно быть отражено в нормативных технических документах (НТД). Требуется разработка новых эффективных и информативных методов геомеханических испытаний для подобных случаев.

«Вызов» № 2. Системные проблемы геомеханических испытаний для оценки устойчивости берегов водохранилищ и сохранения водных ресурсов

Вода является важнейшим жизнеобеспечивающим ресурсом. В связи с изменениями климата, таянием ледников, деградацией многолетней мерзлоты и подземных вод запасы пресной воды на суше уменьшаются. Единственными крупными запасами пресной воды становятся озера и водохранилища.

В связи с ростом населения, развитием промышленности и иной хозяйственной деятельности потребности в пресной воде стремительно возрастают (рис. 14).

Рис. 14. Графики роста водопотребления и изменение водных ресурсов планеты за последние десятилетия [7]

Поэтому важнейшей задачей является рациональное использование и сохранение водных ресурсов. Между тем, интенсивное и часто нерациональное использование водных ресурсов на урбанизированных территориях в последние годы приводит к ухудшению качества воды в крупных водохранилищах. Так, вода ряда Верхне-Волжских водохранилищ (Иваньковского, Угличского, Рыбинского и Горьковского) по интегральным показателям загрязненности характеризуется в диапазоне от «грязная» до «весьма грязная».

На ухудшение качества воды влияют многие факторы, как природные, так и техногенные. Одним из значимых факторов, существенно влияющих на ухудшение качества воды, является переработка берегов водохранилищ, приводящая к обмелению, неуправляемому прогреву воды, развитию водной биоты, зарастанию и заболачиванию прибрежных участков.

Считается, что переработка берегов – естественный и неизбежный процесс, который сопровождает создание и эксплуатацию водохранилища, с течением времени затухает и стабилизируется, когда новый уровень воды и берега приходят в новое равновесное состояние. Но на ряде водохранилищ ожидаемая стабилизация не прослеживается. Это вызывает необходимость целенаправленного системного принятия мер по организации берегозащиты. В первую очередь, инженерные мероприятия должны проводиться на участках берегов, наиболее подверженных разрушениям, и в зонах социально значимых земель (в районах деревень, поселков, городов, объектах культурно-исторического наследия). Для принятия рациональных и экономически оправданных решений по берегозащите необходимо проводить постоянный комплексный мониторинг водных объектов. Для составления точных прогнозов скорости переработки берегов, принятия рациональных решений по берегозащите необходимо, помимо прочего, располагать надежными данными об инженерно-геологическом строении массива, физико-механических свойствах грунтов, слагающих берега водохранилищ и современными расчетно-программными комплексами, а также расчетно-аналитическими методами, позволяющими оценить степень

устойчивости береговых откосов под действием различных факторов. Существующие методы, методики и приборы для проведения геомеханических испытаний и методы расчетов, отраженные в нормах, не позволяют, в связи с протяженностью берегов, трудной доступностью, высокой стоимостью и трудоемкостью эффективно решить данную задачу.

Масштабы проблемы

Согласно каталогу [7], на территории СССР в 1989 г. находилось 41 крупнейшее, 64 крупных, 210 средних и 1906 малых водохранилищ. Общая протяженность береговых линий водохранилищ в РФ составляет 75,4 тыс. км. Помимо медленной переработки берегов большую опасность составляют крупные оползни, которые часто происходят по берегам рек и водохранилищ. При резком обрушении значительных объемов грунта в воды водохранилища часто дополнительным фактором разрушения может явиться образование большой волны, как это было на плотине Вайонт в северной Италии, когда крупный оползень вызвал огромную волну высотой 150 м. Волна перехлестнулась через плотину и «смыла» несколько поселков. В результате трагедии погибло три тысячи человек.

11 декабря 2018 г. в Хабаровском крае случилась крупная природная катастрофа. С крутого левого склона долины р. Буреи сошел крупный оползень. Оползень произошел в скальной толще, представленной протерозойскими метаморфизованными образованиями. Значительную роль в создании условий для сдвига оползня сыграло обводнение грунтов при заполнении водохранилища (рис. 15).

Рис. 15. Общий вид оползня (а) и схема обрушения (б).

Источник: <https://amurmedia.ru/news/amp/773733/>

Случаи, при которых объем отделившегося грунта достигает сотен тысяч и миллионов кубических метров, фиксируются пока довольно редко. В их числе можно упомянуть оползень в нижнем течении р. Зеи, сошедший в начале ноября 1985 г. на ее высоком правом берегу. Тогда блок рыхлых отложений размером 1000×400 м сместился вниз на 50 м. Он раздробился на

три фрагмента, общий объем которых составил около 6 млн м³. Оползень, сошедший 3 июля 2007 г. в Долине гейзеров на п-ове Камчатка, перегородил р. Гейзерную. Образовалась плотина внушительных размеров: длина – 300 м, ширина – 200–250 м и высота – до 50 м. Объем оползневого тела составил 20 млн м³.

Однако, следует учесть, что много крупных водохранилищ в РФ находится в криолитозоне, где в связи с оттаиванием мерзлоты, процесс оползнеобразования и переработки берегов будет происходить наиболее интенсивно. Например, водохранилища: Вилуйское, Светлинское, Усть-Хантайское, Курейское, Колымское, Усть-Среднеканское. Большую опасность представляют так же хвостохранилища в криолитозоне.

Пример несовершенства существующих норм и геомеханических испытаний для решения данной задачи

В настоящее время около 30% берегов водохранилищ Волжского каскада подвержены разрушительной береговой эрозии под воздействием техногенных и природных факторов (рис. 16). Например, на Угличском водохранилище, созданном более 75 лет назад, активная переработка берегов по всем расчетам должна была давно завершиться, но наблюдения показывают, что на ряде участков этот процесс идет по-прежнему активно. Фактическое отступление берега здесь уже превысило расчетные значения «конечной стадии» более чем в два раза и продолжается. Протяженность берегов Угличского водохранилища при общей длине 140 км составляет около 1000 км. Берега, как с суши, так и с воды во многих местах труднодоступны. Факторы воздействия, причины и схемы разрушения берегов весьма разнообразны. Для установления причин разрушения берегов на активных участках потребовалось бы проведение огромного объема инженерно-геологических (ИГ) изысканий на участках общей протяженностью около 200 км. Существующие методы, способы и методики геомеханических испытаний не в состоянии выполнить поставленную задачу [7].

Выводы к «вызову» № 2

Требуется разработка новых методов, методик, приборов и мобильных комплексных установок для проведения массовых комплексных геомеханических экспресс испытаний, ориентированных на решение вышеизложенных задач, позволяющих существенно сократить время, стоимость, трудозатраты, повысить их точность и информативность.

Рис. 16. Различные формы (и механизмы) разрушения берегов Угличского водохранилища [7, 11]

Вызов № 3. Изменение инженерно-геологической среды крупных городов в результате техногенных воздействий

Одной из причин массовых аварийных и предаварийных ситуаций, которые могут проявляться сразу на нескольких построенных объектах в крупных городах, является значительное изменение физико-механических свойств грунтов на больших площадях в результате значительных техногенных воздействий.

Площадь современных крупных городов в последние годы стремительно увеличивается (рис. 17). Наблюдается устойчивая тенденция к повышению этажности зданий, устройству более глубоких выемок и протяженных подземных сооружений, развитых сетей транспортных и инженерных коммуникаций [9, 10].

Рис. 17. Карты г. Москвы, иллюстрирующие: а – рост площади города, б – подтопления территории, в – карстово-суффозионную опасность [9]

Увеличение темпов строительства, расширение площади городов оказывает негативное воздействие на геологическую среду, вызывая активизацию потенциально опасных геологических процессов и аварии сооружений. Эти обстоятельства приводят к дополнительным изменяющимся во времени новым воздействиям на построенные сооружения и диктуют особые требования к проведению геомеханических испытаний в условиях мегаполисов.

По оценке академика РАН В.И. Осипова [9, 10], на период 1997 г. 48% территории г. Москвы находилось в зоне инженерно-геологического риска и площадь этих зон продолжает увеличиваться. В 1960 гг. зародилось и преобразовалось в самостоятельную научную дисциплину такое направление, как «урбанистическая геология» (Дж.Т. МакГилл, М. Калшоу и С. Прайс, Р. Леггет), которая изучает изменение инженерно-геологической среды мегаполисов под воздействием техногенных нагрузок.

Особенности проведения ИГ изысканий в мегаполисах

Поскольку многие здания и сооружения в мегаполисах, построенные в одних инженерно-геологических условиях за счет изменения свойств грунтов от техногенных нагрузок продолжают эксплуатироваться, но уже в совершенно других (измененных) условиях, то это обстоятельство диктует ряд особенностей при проведении ИГ изысканий в развивающихся мегаполисах [12].

Основные факторы, процессы и вытекающие из них новые требования к проведению геомеханических исследований в условиях мегаполисов приведены на схеме (рис. 18).

Рис. 18. Факторы, процессы и требования к геомеханическим испытаниям в условиях мегаполисов

Поскольку в результате активных техногенных воздействий механические свойства грунтов могут существенно измениться (в результате водонасыщения, суффозии, загрязнений, динамических нагрузок и др.) необходимо, чтобы методики проведения геомеханических испытаний позволяли оценить возможные изменения свойств грунтов в результате этих воздействий. Существующие методики эффективно это сделать не позволяют. Представляется актуальным разработать такие методики.

Масштаб проблемы

Россия относится к странам с высоким уровнем урбанизации, который продолжает увеличиваться. Сегодня в городское население составляет 80%. За 2013–2019 гг. доля городского населения в общей численности населения России выросла на 0,6%, что связано с «сельско-городскими» миграциями.

Самыми урбанизированными территориями России являются Северо-Западный и Центральный федеральные округа. Среднероссийский уровень этого показателя отмечается в Сибирском, Дальневосточном и Приволжском федеральных округах. Урбанизация в РФ имеет свои особенности: крупные города стремительно растут, а в малых городах население убывает. Особенно стремительно растут самые крупные мегаполисы, такие как города Москва и Санкт-Петербург. Рост мегаполисов порождает множество проблем и приводит к огромному сосредоточенному воздействию на природную среду.

Пример сложности проведения ИГ изысканий в мегаполисах из-за большого количества коммуникаций и высокой плотности застройки (рис. 19)

Рис. 19. Авария при проходке подземного коллектора на ул. Б. Дмитровке из-за увеличения расстояния между ИГ скважинами: а – разрез, б – фото [12]

Из-за того, что изыскатели вынужденно не смогли пройти скважину в требуемом месте, был пропущен важный ИГЭ – русло древнего водотока, размывшего твердые глины, в которых велась проходка коллектора. Когда щит уперся в водонасыщенные пески (плывун), в коллектор быстро стал поступать грунт, в результате чего на поверхности образовалась провальная воронка.

Выводы к «вызову» № 3

1. В условиях плотной застройки, строительство сооружений с развитой подземной частью и с повышенной этажностью может оказывать существенное влияние на окружающие объекты. При этом, преграждение естественных путей фильтрации подземной частью сооружения, изменение уровня грунтовых вод, повышение градиентов напоров и изменение направления фильтрационного потока может вызывать изменения механических свойств грунтов оснований на значительном расстоянии от объекта. В этих условиях необходимо проводить ИГ изыскания не только непосредственно для строящегося объекта, но и для всей зоны возможного влияния строящегося сооружения. Это неизбежно приводит к увеличению объемов и стоимости инженерных изысканий. Для сокращения стоимости изысканий требуется разработать более технологичные и

информативные методы, способы, методики и оборудование для геомеханических испытаний, т.к. существующие традиционные методы это не позволяют.

2. В стесненных условиях плотной застройки, учитывая большое количество подземных инженерных коммуникаций, развитую транспортную сеть и интенсивность движения, проведение ИГ изысканий традиционными методами часто представляет собой неразрешимую задачу. Для проведения геомеханических исследований в стесненных условиях подвалов зданий требуется разработка мобильных изыскательских комплексов, дополняющих, в случае необходимости, традиционные методы испытаний.

3. Для сокращения объемов геомеханических исследований и разработки рациональной программы ИГ изысканий целесообразно использовать вариантное моделирование, которое может позволить установить наиболее значимые факторы возможного изменения условий на работу сооружений. Следовательно, составление прогнозных моделей и проведение вариантных расчетов становится не самостоятельной отдельной задачей, а должно являться неотъемлемой частью ИГ изысканий.

4. Особым требованием к проведению геомеханических испытаний является то, чтобы полученные в ходе исследований показатели свойств грунтов были бы достаточны для применения сложных моделей, используемых в современных расчетных комплексах.

Часть 2. Вопросы методологии совершенствования геомеханических испытаний

Методоло́гия (от греч. μεθoδoλoγία – учение о способах; от др.-греч. μέθοδος из μέθ- + одос, букв. «путь вслед за чем-либо» и др.-греч. λόγος – мысль, причина) учение о системе понятий и их отношений, **система базисных принципов, методов, методик, способов и средств их реализации** в организации и построении научно-практической деятельности. Чтобы не было путаницы в терминах «методология–метод–методика» даны определения этих понятий.

Если идти от общего к частному, то правильной будет следующая иерархия.

Методология – наука. Совокупность методов, применяемых в отдельных науках; учение о структуре, логической организации, методах и средствах деятельности.

Метод – частное понятие – путь исследования и практического осуществления чего-то конкретного, способ достижения определенной цели.

Методика – система приемов, набор конкретных инструкций, регламентирующих действия, общий свод правил, алгоритм.

Любая наука в том или ином виде имеет свою методологию. По мере развития науки методология исследований может дополняться и уточняться.

Если рассматривать инновации в области совершенствования методов геомеханических испытаний как раздел (часть) геомеханики, то для ее системного развития нужно иметь свою методологию – научно обоснованную систему базовых принципов, методов и приемов. Одним из таких базисных принципов является анализ эволюции методов изучения механических свойств грунтов, поиск закономерностей и прогнозирование направлений развития на основе изучения основных трендов.

В настоящее время основными трендами совершенствования геомеханических испытаний являются: автоматизация процесса испытаний, попытка повышения информативности экспериментов за счет оснащения приборов и установок дополнительными измерительными и вспомогательными устройствами, датчиками и др., стремление к отказу от методов, связанных с трудоемкими подготовительными работами, к повышению технологичности полевых и лабораторных экспериментов, стремление к созданию многофункциональных установок и приборов.

Вместе с тем в настоящее время принципиально новые методы геомеханических исследований практически не разрабатываются, модернизация осуществляется достаточно медленно и в рамках научных основ, разработанных еще в середине XX в. Разработки осуществляются, как правило, точно, бессистемно и без опоры на научно обоснованную методологию инноваций.

Как показывает анализ истории становления геомеханики, появление новых методов геомеханических испытаний тесно связано с появлением новых «вызовов» и новых задач. Из этого следует, что бурно новые методы и направления развиваются только тогда, когда старыми известными методами возникающие новые задачи решить невозможно.

Для того, чтобы разработать систему базисных принципов в области дальнейшего целенаправленного совершенствования геомеханических испытаний на данном этапе (т.е. рассмотреть и уточнить вопросы методологии инноваций) целесообразно сначала рассмотреть новые актуальные проблемы и глобальные «вызовы», т.к. вопросы не могут быть решены в рамках известных методов геомеханических исследований. Это поможет определить требования к будущим разработкам в этой области, а эти требования, в свою очередь, помогут уточнить и дополнить совокупность общих подходов и систему базисных принципов (то есть методологию) к инновациям в этой сфере.

Предлагаемый методологический подход к системным инновациям методов геомеханических испытаний для ответа на новые «вызовы».

Для целенаправленного эффективного совершенствования геомеханических испытаний, отвечающих новым вызовам, требуется уточнить методологические подходы к инновациям в данной области.

Составляющими предлагаемого методологического подхода к системным целенаправленным инновациям в сфере геомеханических испытаний для ответа на вышеуказанные вызовы могут являться:

1. использование при создании и совершенствовании новых методов общих законов эволюции технических систем;
2. использование при разработках и совершенствовании методов и алгоритмов системного анализа;
3. принятие единой терминологии и единой классификации методов геомеханических испытаний;
4. использование при совершенствовании и разработке новых методов геомеханических испытаний принципа рационального баланса между стоимостью и точностью испытаний;
5. синхронизация элементов системы «изыскания–геомеханические расчеты–проектирование», в частности, выражающаяся в том, что модели грунта, используемые при интерпретации опытных, данных должны соответствовать моделям, используемым в геотехнических расчетах;
6. включение в состав геомеханических изыскательских комплексов расчетных методов и вариационных расчетов для оптимизации программы исследований;
7. создание организационных механизмов для стимулирования изобретательской деятельности и для более быстрого внедрения апробированных эффективных разработок.

Геомеханические исследования, как система и законы развития (эволюции) систем

Под системой обычно понимают полный целостный набор (совокупность) элементов, взаимосвязанных между собой так, чтобы могла реализоваться главная функция системы.

Многие объекты, в т.ч. технологические и технические, можно рассматривать как системы.

Раздел геомеханики, посвященный исследованию прочностных и деформационных свойств грунтов, можно рассматривать как систему. Эта сложная, постоянно развивающаяся система, состоит из множества элементов: методов, способов, методик, установок и приборов для геомеханических испытаний, накопленных знаний о механических свойствах грунтов, нормативной литературы, фирм, организаций и специалистов, осуществляющих геомеханические исследования и др., связанных между собой прямыми и обратными связями.

Данная система имеет общую цель (функцию) – определить (различными способами) прочностные и деформационные характеристики грунтов для последующего их использования при расчетах и проектировании строящихся и реконструируемых сооружений.

Составляющие элементы этой системы, такие как методы, приборы и др., также в свою очередь являются системами и по отношению к системе более высокого порядка – подсистемами.

Эти системы находятся в постоянном развитии, ее элементы и связи совершенствуются, общий ее потенциал (информационно-энергетический) растет для более эффективного выполнения главной функции. Для повышения эффективности системы работа ее элементов должна быть синхронизирована. Например, для повышения достоверности геотехнических расчетов все параметры принятой модели должны быть экспериментально определены с требуемой точностью.

Все системы, в т.ч. и технические, развиваются (эволюционируют) по единым общим законам, в соответствии с условиями и ограничениями, которые им создает внешняя среда. В данном случае внешней средой рассматриваемой системы является область «строительство», а для нее, в свою очередь, внешней средой является область «экономика».

Знание основных законов развития систем позволяет определить перспективные направления исследований в этой области, в зависимости от текущего состояния системы и стадии ее развития, понять естественное направление их эволюции, осуществлять управляемую их эволюцию, то есть целенаправленное совершенствование.

Законы развития технических систем впервые были сформулированы Г.С. Альтшуллером (1979) и далее развиты в трудах А.А. Гусакова (1983), Е.П. Балашева (1985), А.И. Половинкина (1985, 1988), Б.Л. Злобина и А.И. Зусмана (1989), Ю.П. Салматова (1991, 1996), Н.П. Абовского (1998) и многих др.

Перечислены основные законы развития технических систем: закон стремления системы к «идеальности»; закон S-образности развития системы; закон «динамизации»; закон полноты частей системы; закон опережающего развития рабочего органа; закон перехода «моно-би-поли»; закон перехода с макроуровня на микроуровень.

Если направления совершенствований выполняются бессистемно и хаотически и не совпадают с естественным трендом законов эволюции системы на данной стадии, то такие изменения не могут привести к заметному росту потенциала системы и будут не востребованы.

В ИПРИМ РАН, используя известные законы развития систем и разработанные к настоящему времени методики системного анализа, разрабатываются новые эффективные способы и методики для геомеханических исследований, в т.ч. для многолетнемерзлых грунтов, мобильные изыскательские комплексы для проведения всего комплекса необходимых геомеханических испытаний в стесненных условиях и труднодоступных местах, что представляет собой важнейшую и актуальную задачу [6].

Методы и приемы системного анализа

В трудах многих исследователей, занимающихся вопросами системного анализа и изобретательства разработаны конкретные методические приемы и алгоритмы функционально-структурного подхода, в т.ч. и применимых к активному поиску новых технических решений.

В настоящее время уже имеется несколько сотен методов, ориентированных на решение задач различного класса. Их можно сгруппировать в следующие блоки: *Методы случайного поиска, Методы функционально-структурного исследования, Методы логического поиска, Проблемно-ориентированные методы.*

Более подробно с этими методами можно ознакомиться в трудах Н.П. Абовского [1].

Терминология и классификация

В области геомеханических исследований к настоящему времени не разработана единая полная классификация методов геомеханических испытаний. Кроме этого существует нечеткость и неоднозначность в терминологических понятиях. Вместе с тем, для осуществления системных целенаправленных инноваций необходимо располагать рядом инструментов. Одним из таких инструментов является классификация методов геомеханических испытаний. В науках, изучающих происхождение объектов и их эволюцию, разработаны четкие системы иерархических классификаций.

Такие классификационные системы позволяют: произвести наименование и описание таксонов; выполнить диагностику объекта (определить его место и координаты в системе классификации); произвести экстраполяцию (предсказание свойств и признаков нового создаваемого объекта); осуществлять целенаправленный поиск объектов по его признакам и свойствам.

Подобные иерархические классификации разработаны, например, в биологии и геологии. Исходя из выше изложенного, по аналогии с иерархической классификацией в биологии и в геологии построена иерархическая классификация геомеханических испытаний (табл. 1, рис. 20).

Все известные геомеханические испытания, позволяющие оценить прочностные и деформационные свойства грунтов, **можно разделить на несколько больших групп, которые используют разные методы воздействия на исследуемую среду:** механические (прямые) методы, геофизические и расчетно-аналитические (косвенные) методы. Известны также методы назначения механических характеристик грунтов для проектирования строительных сооружений с использованием объектов аналогов, а также модельные испытания, которые также относят к косвенным методам.

При этом **механический метод испытаний** предполагает нагружение массива (образца) грунта механической нагрузкой, измерение «отклика» исследуемой среды на механическое воздействие (измерение перемещений или напряжений в определенных точках массива) и определение параметров выбранной для описания механического поведения модели среды на основе

соответствующих теоретических решений. Важно отметить, что *НДС исследуемого грунта в результате механического воздействия существенно изменяется.*

Таблица 1

Предлагаемая иерархическая система методов геомеханических испытаний
и условное сопоставление с биосистематикой и геологической классификацией

№ п/п	Наименование ранга	Соответствие биосистематике	Соответствие геологической классификации
I	Инженерно-геологические изыскания	«Царство» (regnum)	Геологические элементы
II	Геомеханические испытания. Тип исследований. Характеризует и конкретизирует общее направление исследований, относящихся к сфере инженерно-геологических изысканий	«Тип» (phylum)	Литосфера
III	Метод. Разделяется, как минимум, на пять широко используемых основных методов: механический метод (прямой), геофизический метод, расчетно-аналитический метод, метод моделирования и метод аналогий (косвенные методы) + физический метод – на основе других физических принципов	«Класс» (classis)	Формационный комплекс
IV	Способ. Понятие «способ» следует отнести на ступень ниже, чем понятие «метод». Например, метод механических испытаний можно реализовать разными способами: штамповым способом, способом осесимметричного нагружения массива в выработках (центральный гидравлический штамп (ЦГШ), напорная камера, прессиометр), путем испытания образцов или целиков правильной формы	«Отряд» (ordo)	Геологическая формация
V	Методика и модель. Понятие «методика» тесно связана с понятием «цель исследования». Целью геомеханических исследований является обычно определение параметров механических свойств, а это	«Семейство» (familia)	Горная порода

№ п/п	Наименование ранга	Соответствие биосистематике	Соответствие геологической классификации
	связано с понятием «модель грунта» . В геомеханических исследованиях реальный массив грунтов, обладающих массой известных и неизвестных свойств, таких как масштабная неоднородность, дискретность, физическая и геометрическая анизотропия, нелинейность, ползучесть, пластичность и т.д., заменяют упрощенной моделью, выделяя только главные свойства, присущие массиву грунта. Далее в процессе испытания, по сути, определяют не прочностные и деформационные характеристики самого массива грунта, а характеристики выбранной модели, используя для этого определенную методику		
VI	Схема. Геомеханические испытания, выполняемые определенным способом, могут использовать принципиально одну и ту же модель среды, и практически одинаковую методику, но, тем не менее, осуществляться по разным схемам. Например, геофизические исследования (ультразвуковые исследования, электроразведка) могут осуществляться по разным схемам (по схеме прозвучивания, по схеме профилирования, по схеме каротажа)	«Род» (genus)	Минерал
VII	Оборудование, установка, прибор. «Оборудование» – совокупность механизмов, машин, устройств, приборов, необходимых для выполнения какой-то работы. «Установка» – единая совокупность (система) механизмов, приспособлений. «Прибор» – обобщающее название большой группы устройств для измерения, регистрации, вычислений и мн. др.	«Вид» (species)	Химический элемент

Рис. 20. Предлагаемая схема классификации геомеханических испытаний

Геофизический метод испытаний основывается на том, что на исследуемый грунт подвергают не механическим, а физическим воздействием различной природы (прозвучиванию ультразвуковыми и сейсмическими волнами, пропуску через среду электрического тока, радиационному облучению и т.д.). На основе теоретических решений по результатам замеров откликов среды на данные воздействия *по корреляционным зависимостям, связывающим механические характеристики и отклики на физическое воздействие* (скорость прохождения волн, электрическое сопротивление среды, радиационную проницаемость) определяют механические характеристики используемой модели грунта. При этом в результате физических воздействий НДС исследуемой среды не меняется или изменяется по сравнению с механическим воздействием незначительно.

Расчетно-аналитический метод исследований предполагает вообще отсутствие какого-либо дополнительного воздействия (механического,

физического) непосредственно на исследуемую среду. Механические характеристики используемой модели определяются либо расчетным путем на основе изучения структуры среды и механических свойств ее элементов, либо в результате наблюдений за ее поведением под действием естественных природных воздействий. К такому методу можно отнести метод обратного расчета устойчивости склонов (Г.Л. Фисенко), расчетно-экспериментальный метод определения механических характеристик сложных композитных сред (группа авторов под руководством проф. С.Б. Ухова), метод определения сопротивления сдвигу блоков скальных грунтов по трещинам на основе изучения шероховатости трещин (И.О. Могилевская, С.Б. Ухов и В.Н. Бурлаков), метод осреднений деформационных характеристик (А.Н. Власов и В.П. Мерзляков) и др.

Метод аналогий, имеет место тогда, когда характеристики среды «назначаются», используя объекты-аналоги. Для использования этого метода необходимо иметь систему критериев, позволяющих оценить степень соответствия свойств и условий работы массива грунта объекта-аналога, и свойств массива грунта проектируемого сооружения. Для этого используют различные методы эмпирических классификаций качества массива, который позволяет использовать огромный накопленный ранее опыт проектно-изыскательских и строительных работ. Некоторая неточность непосредственного пересчета геологических параметров в геомеханические свойства массива грунта при его применении компенсируется возможностью определения механических свойств большого объема массива, а также быстротой и низкой стоимостью исследований.

В новую, особую группу можно выделить *физико-механические методы*, когда грунт подвергается физическим воздействиям, но НДС при этом существенно не меняется. В эту группу можно отнести такие способы, как вакуумирование грунта, способ теплового нагружения скального грунта и др.

Важным признаком видов геомеханических испытаний для масштабно неоднородных грунтов является масштаб исследований (объем исследованного грунта). Данный признак характеризует *стоимость* (трудоемкость, степень доступности) и *точность* (надежность) испытаний, которая зависит от масштабного фактора [13] (для структурно неоднородных сред) и степень нарушения первоначальных свойств грунтов в процессе подготовки опыта (расструктурирование, разуплотнение, разгрузка, появление дополнительных дефектов, изменение влажности и др.).

Необходимо уточнить терминологические понятия, что подразумевается под массивом, участком массива, целиком, монолитом, образцом и пробой. Для удобства обозначения линейный размер сооружения принят за L , а линейный размер участка грунта, подвергаемого воздействиям за l :

– «массив» – объем (площадь, линейный размер) значительной части грунтового основания, сопоставимый (равный) объему грунта, подвергающегося

воздействию реального сооружения, с относительным линейным размером $l = (1-10^{-1})L$;

- «**участок массива**» – представительный (включающий характерные неоднородности), объем (площадь, линейный размер) достаточно большой части грунтового основания с линейным размером $l = (10^{-2}-10^{-3})L$;
- «**целик**» – оконтуренный участок грунта в месте естественного залегания имеющий связь минимум по одной плоскости с основным массивом, с размерами $l = (10^{-2}-10^{-3})L$;
- «**монолит**» – оконтуренный со всех сторон объем ненарушенного грунта, отобранного из шурфа или штольни с линейным размером $l = (10^{-4})L$;
- «**образец**» – оконтуренный и обработанный со всех сторон небольшой объем грунта, вырезаемый из монолитов или подготавливаемый из керна, как правило, правильной геометрической формы (куб, прямоугольная призма, цилиндр) с линейным размером $l = (10^{-5})L$;
- «**проба**» – кусочек грунта неправильной формы с размерами $l = (10^{-6})L$.

Таким образом, предлагаемая система трехмерной классификации (по трем независимым классификационным критериям) будет представлять собой в графическом отображении трехмерную фигуру.

Использование принципа рационального баланса между стоимостью и точностью испытаний

Все существующие способы и методики геомеханических испытаний можно достаточно полно охарактеризовать следующими тремя основными технико-экономическими категориями: «точность» (достоверность), «стоимость» и «скорость» (время) испытаний (рис. 21) [6, 12].

Рис. 21. Диаграмма экономических категорий, характеризующих методы геомеханических испытаний

Однако эти три экономические категории находятся в противоречии друг с другом. Так, например, если требуется повышенная точность (достоверность)

результатов испытаний, то такие испытания требуют значительных материальных затрат и длительного времени.

Зоны пересечения областей на диаграмме соответствуют определенным видам геомеханических испытаний.

Зона пересечения областей «скорость» и «стоимость» означает, что геомеханические испытания должны обладать высокой скоростью и малой стоимостью. Это соответствует такому виду испытаний, как экспресс-методы. К ним можно отнести такие испытания, как статическое зондирование, геофизические испытания, испытания шаровым штампом и др. Однако недостатком таких испытаний является малая точность (достоверность) результатов.

Зона пересечения таких областей, как «точность» и «стоимость» означает, что геомеханические испытания, попадающие в зону пересечения данных областей, должны обладать высокой точностью и относительно малой стоимостью. Это соответствует традиционным видам лабораторных испытаний (сдвиговых, трехосных и др.). Для обеспечения достоверности при этом требуется провести испытания большого количества образцов, что требует значительного времени на их отбор, транспортировку в лабораторию, подготовку и проведение нескольких серий длительных испытаний. Таким образом, недостатком этой группы методов является большая длительность.

Зона пересечения таких областей как «скорость» и «точность» означает, что виды испытаний, которые попадают в зону пересечения данных областей, должны обладать высокой точностью (достоверностью), и требуют не столь много времени. Однако, они обладают высокой стоимостью. К этой группе испытаний можно отнести преимущественно полевые испытания, такие как испытания на сдвиг целиков в шурфе, штамповые испытания, испытания свай статической нагрузкой и др. Недостатком таких испытаний является их относительно высокая стоимость.

Для осуществления эффективного проектирования фундаментов и проведения геомеханических испытаний в условиях возможного изменения свойств грунтов под действием природно-техногенных факторов, требуется проводить большой объем исследований с достаточной для данных целей точностью. Однако, если использовать существующие известные методы, – это потребует значительных материальных затрат.

Таким образом, для эффективного решения поставленных задач требуется разработка принципиально новых способов и методик геомеханических испытаний, которые на диаграмме находились бы в зоне пересечения всех трех областей «стоимость», «точность» и «скорость», то есть обладали бы достаточно высокой точностью, малой стоимостью и высокой скоростью проведения испытаний. Однако эффективно это можно сделать только с использованием системного подхода.

Оптимальная точность геомеханических исследований

Общую идею поиска оптимального соотношения между стоимостью и точностью геомеханических испытаний, которая была положена в основу экспертной системы рейтинговой оценки эффективности методов, разработанную в ИПРИМ РАН [6] можно пояснить на следующем графике (рис. 22).

Рис. 22. Зависимость стоимости испытаний (1), стоимости сооружения (2) и их суммарной стоимости (3) от точности испытаний: а – для сооружения, стоимость которого значительно зависит от точности определения характеристик; б – для сооружения, стоимость которого слабо зависит от точности испытаний

Стоимость сооружения (кривая 2) зависит от достоверности инженерно-геологических изысканий и, соответственно, точности определения механических характеристик грунтов основания. С увеличением точности стоимость сооружения уменьшается за счет уменьшения неоправданных запасов. С другой стороны, при увеличении точности геомеханических испытаний возрастает их стоимость (кривая 1). Суммарная же стоимость геомеханических испытаний и сооружения (кривая 3) будет иметь минимум в определенной точке, которая соответствует не максимальной, а оптимальной точности при минимуме общих затрат. Если стоимость сооружения существенно зависит от точности геомеханических испытаний (график а), то оптимальная точность должна быть высокой, если нет (график б), то и оптимальная точность испытаний может быть невысокой. Таким образом, экономия на точности и достоверности испытаний значительно увеличивает стоимость сооружения. С другой стороны, нет необходимости однозначно стремиться к экономически неоправданному повышению точности испытаний. С развитием эффективных и экономичных геотехнологий, направленных на улучшение строительных свойств грунта, требования к точности геомеханических испытаний будет снижаться. Для определения оптимальной точности геомеханических испытаний целесообразно перед составлением программы исследований провести серии численных расчетов для определения степени влияния механических свойств грунтов различных ИГЭ на стоимость проектируемого сооружения.

Разработанная в ИПРИМ РАН на основе этой идеи система рейтинговой оценки методов геомеханических испытаний [6] позволяет формализованным образом определить область применения разработки, выявить ее сильные и слабые стороны, целенаправленно осуществлять улучшение комплекса ее параметров, автоматически формировать взаимодополняемые методы в эффективные комплексы.

Синхронизация элементов системы

Рассмотрены примеры, когда система «геомеханические испытания–геотехнические расчеты» не синхронизирована.

Первый пример, когда для интерпретации, например, штамповых опытов трансверсально изотропного грунта используется одна модель (изотропный грунт), а в геотехнических расчетах (например, расчетах обделки туннеля) используется модель трансверсально-изотропного грунта.

В процессе опытов на сжатие вертикальной нагрузкой по формулам, полученным для изотропной среды, определяется «кажущийся» модуль деформации (E_2^*) в плоскости, перпендикулярной плоскости изотропии, а из опытов вдоль слоистости определяется «кажущийся» модуль деформации (E_1^*).

Затем, для получения основных истинных параметров деформируемости трансверсально-изотропной среды (E_1 ; E_2) «кажущуюся» степень анизотропии определяют из отношения:

$$n^* = E_1^*/E_2^*. \quad (2)$$

Однако фактическая степень анизотропии, как показывают точные решения анизотропной теории упругости, будет значительно больше «кажущейся» (рис. 23) [5]. Если эти данные использовать в расчете обделки туннеля в слоистом трансверсально-изотропном грунте, то, как показывают расчеты, фактические изгибающие моменты будут значительно выше расчетных, что может привести к разрушению обделки.

Поэтому очень важно, чтобы НДС и принятая модель среды в экспериментах и при расчетах сооружений были идентичны.

Поскольку реальный грунт обладает многими свойствами (геометрическая и физическая анизотропия, неоднородность, нелинейность и мн. др.), а модель грунта, используемая при интерпретации экспериментов и при расчетах, обладает только частью свойств реальной среды, желательно, чтобы НДС, реализуемое в основании сооружения, соответствовало НДС, реализуемое в опытах. В этом случае погрешности, связанные с несовершенством модели грунта, нивелируются.

Очень важно также, чтобы все основные характеристики модели грунта могли бы быть определены из эксперимента. В настоящее же время достаточно типичной ситуацией является, когда при расчетах проектировщики используют сложные модели грунта, а изыскатели не в состоянии экспериментально определить необходимые параметры модели. В результате элементы системы

«изыскания–проектирование» оказываются не синхронизированы и существенный суммарный положительный эффект не достигается.

Рис. 23. График зависимости «кажущейся» степени анизотропии n , определенной по отношению модулей деформации в плоскости изотропии (а, б) и в перпендикулярной ей плоскости (в, г) при обработке штамповых испытаний по изотропной модели от истинной степени анизотропии. Теоретические решения для бесконечно длинного штампа (1); для кольцевого штампа (2) [5] (д)

Поэтому очень важно при разработке новых методов стремиться к синхронизации элементов системы «изыскания–проектирование».

Включение в состав геомеханических изыскательских комплексов расчетных методов и вариационных расчетов для оптимизации программы исследований

Обычно геомеханические испытания представляют собой отдельную самостоятельную область деятельности, а расчеты и численное моделирование представляет собой другую самостоятельную область. Геотехнические расчеты обычно производят на основе результатов, выполненных геомеханических испытаний.

Между тем, в связи с бурным развитием компьютерных технологий и расчетных программных комплексов, работы по численному моделированию системы «сооружение–основание» сегодня значительно легче, быстрее и дешевле осуществить, чем сами геомеханические испытания. В этой связи целесообразно перед выполнением геомеханических исследований проводить варианты геотехнические расчеты для определения необходимой (оптимальной) точности определения механических свойств всех ИГЭ. Это можно легко сделать, задавая последовательно различные значения механических характеристик в разумном вероятном диапазоне и определять чувствительность поведения (осадки, смещения, устойчивость и т.д.)

сооружения и основания к изменениям значений характеристик каждого ИГЭ. Это позволит существенно оптимизировать программу изыскательских работ и оценить возможность и необходимость применения того или иного метода (способа) испытаний. Следовательно, целесообразно включать численное вариантное моделирование в состав изыскательского комплекса.

Другой важной возможностью численного моделирования является то, что численные расчеты могут эффективно использоваться при интерпретации опытных данных. Это открывает новые возможности в области совершенствования способов геомеханических испытаний. Например, ранее, из-за сложности интерпретации результатов опытов использовались образцы (штампы, целики и т.д.) правильной геометрической формы, то сейчас не возникает никаких проблем получения решений для любых случаев.

Еще одним направлением использования численного моделирования является возможность определения механических характеристик путем проведения «обратных» расчетов.

Таким образом, симбиоз экспериментов и численных расчетов представляется весьма перспективным.

Результаты (примеры) инновационных разработок на разных объектах

Используя законы эволюции технических систем, методы системного анализа, представленную классификацию и рейтинговую оценку методов геомеханических исследований в ИПРИМ РАН разработана группа эффективных и информативных методик определения механических свойств мерзлых грунтов, позволяющих в десятки раз сократить стоимость и трудоемкость испытаний. Эти инновации выполнены при проведении геомеханических исследований на конкретных объектах и показали высокую эффективность (табл. 2).

Таблица 2

Инновационные разработки [6]

№	Объект	Грунт	Основные результаты инноваций
1	Иштуганов- ская ГЭС 1980–1983 гг.	Трансверсаль- но изотропные песчаники и алевролиты	Методика определения параметров деформируемости трансверсально изотропных грунтов по результатам испытаний методом кольцевого нагружения
2	Вилуйская ГЭС-3 1984–1986 гг.	Мергель в мерзлом состоянии. Суглинок с дресвой и щебнем в мерзлом и оттаивающим состоянии	Методика определения параметров длительной прочности и деформируемости в ползуче-релаксационном режиме нагружения при различных видах испытаний (сдвиговые, трехосные, шаровым штампом), в т.ч. при различных температурах. Автоматизированные приборы для испытаний в ползуче-релаксационном режиме (ППР) – сдвиговой, шарового штампа. Способ испытаний кольцевым ребристым штампом

Материалы Общероссийской научно-практической конференции и выставки
«Полевые и лабораторные методы исследования грунтов – проблемы и решения»,
г. Москва, 21 мая 2021 г.

№	Объект	Грунт	Основные результаты инноваций
3	Проектируемая Адычанская ГЭС 1987–1990 гг.	Трещиноватые граниты в мерзлом состоянии. Песчано-гравийные грунты в мерзлом и оттаивающем состоянии	Способ сдвига целиков гранита по трещине с вакуумной пригрузкой. Установка для кольцевого сдвига слепков трещин. Метод теплового нагружения массива. Схема вакуумного стабилметра
4	Обследование оснований зданий; обследование зданий храмов 1991–2015 гг.	Грунты в зонах инженерно-геологического риска мегаполисов	Элементы мобильного комплекса для проведения геомеханических испытаний грунтов основания зданий: способ крыльчатки с криволинейными лопастями, способ испытания кернов вращением крыльчатки с радиальной пригрузкой, способ испытания целиков грунта инвентарной установкой с наклонной нагрузкой и др.
5	Угличское водохранилище 2016–2017 гг.	Моренные суглинки	Универсальный мобильный комплекс для геомеханических исследований. Элементы комплексного мониторинга берегов водохранилищ
6	Комплекс работ по адаптационным технологиям для объектов ПАО «Газпром» 2018–2019 гг.	Мерзлые грунты	Методика и прибор для определения коэффициента вязкости грунта с помощью испытания способом шарового штампа в режиме ПРР (модифицированный прибор шариковой пробы, климокамера). Способ и методика испытания кручением с помощью кольцевого ребристого штампа с криволинейными лопастями в режиме ПРР (полевая установка кольцевого ребристого штампа (КРШ) с возможностью изменения температуры). Методика и установка для определения параметров деформируемости грунтов плоским штампом. Способ, методики и установки для определения несущей способности свай (раздельно по боковой поверхности и под нижним концом), вмороженных в грунт при различных температурах. Лабораторная установка для определения несущей способности свай по боковой поверхности при различных температурах. Способы сохранения эксплуатационной способности газодобывающих скважин
7	Объекты ПАО «Норникель» 2020–2021 гг.	Мерзлые и оттаивающие трещиноватые габбро-долериты	Совершенствование аналитических расчетных методов эффективных характеристик сложных гетерогенных сред и методов численного термомеханического моделирования

Часть 3. Примеры совершенствования геомеханических испытаний на основе предлагаемой методологии

Приведены примеры системных инноваций по разработке новых эффективных и информативных методик по определению механических свойств мерзлых грунтов, разработанных в ИПРИМ РАН и НИУ МГСУ [6].

Общий вид кривых ползучести, релаксации касательных напряжений и длительной прочности мерзлых грунтов, получаемых в ходе предлагаемых испытаний (рис. 24), для большей наглядности взаимосвязи всех переменных представлены в виде трехмерных проекций четырехмерной функции $\tau_{пред} = f(\gamma, \sigma, t)$.

Рис. 24. Традиционное графическое представление зависимостей « τ – γ »; « τ – t » и « γ – t » (а); кривые (поверхности при $\gamma = const$) длительной прочности (2), релаксации касательных напряжений (1) (б); кривые (поверхности при $\sigma = const$) ползучести (4) и релаксации касательных напряжений (1) (в); кривые (поверхности при $t = const$) прочности (2) и кривые ползучести (4), 3 – траектория нагружения по предлагаемой методике (г)

На этих обобщенных графиках в соответствующих сечениях легко «узнать» привычные графики условно мгновенной и длительной прочности, затухающие и прогрессирующие деформации ползучести, графики релаксации

напряжений и др. Анализируя эти трехмерные фигуры можно представить различные траектории нагружения, которые реализуются при классических методиках испытаний и в режиме ПРР. Пунктиром показана траектория нагружения при испытаниях в режиме ПРР, о которой речь пойдет ниже.

Справочно: впервые испытания в режиме ПРР были разработаны автором и группой коллег из МИСИ-МГСУ еще в 1982–1985 гг. Следует отметить, что в последние годы многие исследователи оценили новые возможности и перспективы испытаний реологических грунтов в режиме контролируемых деформаций (ползуче-релаксационном режиме нагружения). Так, в НИИОСП им. Н.М. Герсевича А.Н. Труфановым проводились исследования возможности использования ПРР нагружения для компрессионных испытаний [15]. Сотрудники института геоэкологии им. Н.М. Сергеева РАН В.Н. Кутергин, Р.Г. Кальбергенов, Ф.С. Карпенко, А.Р. Леонов, В.П. Мерзляков проводили испытания по данной методике на стабилометре [8]. Испытания свай в режиме ПРР рекомендательно вошли в НТД.

Все исследователи отмечают высокую эффективность данного метода испытаний для грунтов, обладающих реологическими свойствами и большие преимущества по сравнению с традиционными методиками. Однако, еще большие преимущества метод ползуче-релаксационного режима испытаний раскрывает при исследовании мерзлых грунтов при различных температурах и в процессе их оттаивания, делая его действительно уникальным по точности и информативности.

Ниже последовательно рассмотрены методики испытаний по классической схеме, ускоренные способы испытаний и испытания в ползуче-релаксационном режиме нагружения.

Классические способы определения параметров длительной прочности грунтов

Классические способы и методики испытания грунтов, обладающих реологическими свойствами (в т.ч. мерзлых грунтов), основаны на испытаниях образцов на сжатие и, чаще, при длительных сдвиговых испытаниях. Испытания ведут в режиме задаваемых нагрузок до разрушения образца [4, 19]. Основная идея испытаний заключается в том, что к испытываемому объему грунта (образцу, штампу, целику) при фиксированном нормальном напряжении σ ступенчато прикладывают сдвигающие касательные напряжения τ . При этом каждая ступень нагрузки τ_i выдерживается длительное время, в процессе которого фиксируют развивающиеся деформации ползучести. На начальных ступенях нагружения деформации ползучести носят затухающий характер. После превышения предела длительной прочности деформации ползучести носят прогрессирующий характер. За длительную прочность при данной фиксированной ступени нормальной нагрузки принимается ступень касательной нагрузки, при которой сдвиговые деформации начинают носить незатухающий характер [4, 6] (рис. 25). То есть испытания проводят в режиме задаваемых напряжений.

Рис. 25. Результаты сдвиговых испытаний при ступенчато возрастающей нагрузке: кривые развития затухающих и незатухающих деформации ползучести

Длительное предельное сопротивление сдвигу $\tau_{\text{пред}}^{\infty}$ устанавливается путем перестроения результатов испытаний при ступенчато возрастающей нагрузке $\gamma = f(t)$ в полулогарифмические координаты [4].

Существенными недостатками такого подхода к определению параметров длительной прочности для мерзлых грунтов, обладающих ярко выраженными реологическими свойствами, являются:

- значительная длительность опыта (порядка 1 мес. и более) вследствие того, что деформации ползучести при постоянной касательной нагрузке развиваются и затухают крайне медленно, что обуславливает большую длительность испытаний;
- необходимость проведения для определения параметров длительной прочности φ^{∞} , S^{∞} минимум двух испытаний при различных нормальных напряжениях σ . Для учета естественной неоднородности мерзлых грунтов нормативная литература требует проведения минимум шесть испытаний;
- данный метод предусматривает проведение испытаний грунтов при фиксированном его физическом состоянии, т.е. при одном значении отрицательной температуры. Для определения параметров длительной прочности при различных температурах, что часто требуется для расчетов оснований при возможном изменении температуры массива, требуется целая серия длительных испытаний, что существенно удорожает и усложняет геомеханические испытания.

Таким образом, учитывая вышеизложенное, задача по разработке принципиально новых ускоренных методов и методик, позволяющих сократить количество и время испытаний, повысить их информативность была и, остается по сей день актуальной.

Ускоренные способы и методики определения параметров длительной прочности

Исходя из соображений сокращения времени испытаний, Н.А. Цытовичем и С.С. Вяловым в разное время были предложены два иных ускоренных

приближенных метода испытаний, которые частично были свободны от вышеуказанных недостатков: метод шарового штампа Н.А. Цытовича и динамометрический метод С.С. Вялова.

Метод шарового штампа Н.А. Цытовича [6]. Этот ускоренный приближенный метод, существенно отличающийся от классических сдвиговых испытаний, был предложен им еще в 1947 г. Он применяется для определения длительного сцепления как слабых связных грунтов (ил, торф и т.д.), так и для глин твердой консистенции или многолетнемерзлых грунтов. Испытания грунта шаровым штампом заключаются в измерении осадки штампа S при действии на него постоянной нагрузки P . Шаровые штампы применяют для испытаний как в лабораторных, так и полевых условиях (рис. 26).

Рис. 26. Лабораторная (а) и полевая (б) установки для испытаний грунта по методу шарового штампа проф. Н.А. Цытовича; прибор шарового штампа для испытаний в режиме ПРР (в)

При проведении испытаний к шаровому штампу с помощью гирь в одну ступень прикладывается статическая нагрузка. Вес гирь должен быть выбран так, чтобы осадка штампа отвечала следующему условию:

$$0,005 < S/D < 0,1 \quad (3)$$

где S – глубина отпечатка; D – диаметр шарового штампа.

Для вычисления величины сцепления связных пластичных грунтов используют зависимость:

$$C = (\alpha P)/(\pi DS), \quad (4)$$

где P – величина вертикальной нагрузки; α – теоретический коэффициент, полученный А.Ю. Ишлинским на основе задачи для пластичных тел,

обладающих сцеплением равный 0,175–0,180.

В данном способе величина сил сцепления определяется по результатам измерения остаточной глубины вдавливания S диаметром D при действии на него постоянной нагрузки P . По мнению Н.А. Цытовича, уменьшение сил сцепления связных глинистых грунтов обусловлено, главным образом, вязким сопротивлением относительному смещению.

Метод прост в технической реализации и позволяет существенно сократить время испытаний. К недостаткам метода можно отнести следующее:

- поскольку в процессе погружения штампа грунт претерпевает разные стадии деформирования от упругой до пластической, с постепенным образованием зон пластических деформации – результаты испытаний сильно зависят от отношения осадки штампа (S) к диаметру (D), то есть от величины (S/D), а поскольку при приложении постоянной нагрузки конечная осадка штампа заранее не известна, результаты опытов трудно сопоставимы между собой и могут иметь большой разброс данных;
- по этой же причине нельзя в ходе одного опыта с помощью шарового штампа, ступенчато изменяя температуру грунта, определить сцепление при различных значениях температуры;
- метод предназначен для испытания грунтов, обладающих малым углом внутреннего трения. Для грунтов, обладающих внутренним трением, в результате эксперимента определяется не удельное сцепление, а некий обобщенный комплексный параметр, включающий сцепление и сопротивление трению, который принято называть шариковым или эквивалентным сцеплением $C_{ш}$. То есть, метод по результатам одного испытания не позволяет отдельно определить значение удельного сцепления и значение угла внутреннего трения.

Динамометрический метод С.С. Вялова. Принципиально иной подход к определению длительной прочности, существенно отличающийся от классических испытаний, в 1978 г. предложил С.С. Вялов [4]. Основная идея его заключается в том, что к образцу, испытываемому на одноосное сжатие, через жесткий динамометр с помощью винта прикладывают произвольное начальное напряжение σ_0 и регистрируют снижение его во времени (релаксацию) и развитие во времени деформаций образца. По полученным кривым можно определить вид уравнения ползучести и значения входящих в него параметров. Принимая уравнение ползучести в форме

$$\varphi(\gamma) = \tau\psi(t), \quad (5)$$

и полагая $\varphi(\varepsilon) = A_0\varepsilon^m$, функция ползучести $\psi(t)$ определяется как

$$\psi(t) = A_0 \frac{[\varepsilon(t)]^m}{\sigma(t)}, \quad (6)$$

где $\varepsilon(t)$ – деформация образца; $\sigma(t)$ – изменяющееся напряжение динамометра, определяемое по рис. 27.

Если создать (в одну или несколько ступеней) напряжение близкое к условно мгновенной прочности, то конечное значение напряжения в результате релаксации будет близко к пределу длительной прочности, поскольку стабилизацию деформации ползучести, а, следовательно, и стабилизацию процесса релаксации можно рассматривать, как достижение равновесия между действующей внешней нагрузкой и внутренними силами сопротивления грунта. На рис. 27 представлена схема динамометрического испытания и методика ее проведения.

Рис. 27. Схема динамометрического прибора (а), результаты испытаний при разовом нагружении (б), результаты при ступенчатом нагружении (в). Обозначения: 1 – образец, 2 – датчик перемещений, 3 – штамп, 4 – жесткий динамометр, 5 – датчик перемещений динамометра, 6 – рама, 7 – винтовое нагрузочное устройство

Следует отметить, что в определенном смысле эти два, на первый взгляд разных метода, по сути, реализуются в ползуче-релаксационном режиме нагружения. Динамометрический метод основан на испытаниях образца на одноосное сжатие в заданных деформациях, где при приложении нагрузки через упругий элемент (динамометр с винтом) нагрузка релаксирует (уменьшается) до значения, близкого к пределу длительной прочности за счет разжатия динамометра. Метод же шарового штампа, хотя и предполагает испытания в режиме заданной нагрузки (при действии постоянной общей нагрузки), однако при его внедрении в грунт, за счет увеличивающейся площади контакта штампа

с грунтом, удельная нагрузка постоянно уменьшается до стабилизированного значения. Эти особенности двух методов позволяют получить важнейшее преимущество – существенное повышение точности, информативности и сокращение времени испытаний. Недостатком данных способов и методик является малая информативность.

Новые эффективные способы и методики для исследования механических свойств мерзлых грунтов при различных значениях отрицательных температур и в процессе оттаивания в ходе одного опыта.

Методика испытаний шаровым штампом в режиме ползучести-релаксации при различных температурах [18]. Группой авторов из МИСИ-МГСУ еще в 1984–1990 гг. сделана попытка объединить эти два метода с целью повышения точности и информативности испытаний для определения удельного сцепления мерзлых грунтов при различных значениях отрицательной температуры в ходе одного опыта методом шарового штампа в режиме ползучести-релаксации (как в динамометрическом методе) [2]. **Основа предложенной новой методики заключается в следующем:** на выровненную поверхность образца мерзлого грунта с заданной отрицательной температурой θ_1 °С устанавливается шаровой штамп диаметром D . Температура выбирается наиболее низкой из диапазона отрицательных температур, при которых требуется определить сцепление. Затем к шаровому штампу через упругий элемент большой жесткости прикладывается такая сжимающая нагрузка, чтобы относительная осадка штампа (S) находилась в диапазоне $0,04 < S/D < 0,10$. В качестве упругого элемента может быть использован динамометр с винтом или гидродомкрат.

Далее образец испытывается в ползуче-релаксационном режиме, для чего перестают подкручивать винт, создающий нагрузку на динамометр, или подкачивать гидродомкрат. При этом сжимающая нагрузка будет уменьшаться, вследствие развития осадки штампа и связанного с этим разжатия динамометра (или выдвигания штока домкрата). Причем при использовании упругого элемента большой жесткости незначительное увеличение осадки вызовет существенное уменьшение сжимающей нагрузки. С течением времени величина падения нагрузки будет уменьшаться и система «внешняя нагрузка–внутренние силы сопротивления» придет в равновесное состояние при данной осадке, стабилизированной нагрузке P_1 и заданной отрицательной температуре θ_1 °С.

Затем абсолютное значение отрицательной температуры уменьшают до величины θ_2 . Учитывая, что сцепление тем выше, чем ниже значение отрицательной температуры, при повышении температуры (растеплении) система выйдет из состояния равновесия, сжимающая нагрузка P_1 начнет уменьшаться за счет развития перемещений и придет в новое состояние равновесия, характеризуемое осадкой S_2 , нагрузкой P_2 и температурой θ_2 . При этом, если динамометр обладает достаточно большой жесткостью, осадка S_2 близка к S_1 . По полученным значениям из выражения (2) определяют длительное сцепление $C_{\text{ш}}$ при данной отрицательной температуре θ_2 . Далее аналогичным

образом производят несколько ступенчатых повышений температуры до положительных значений и определяют сцепление при этих температурах (рис. 28). По полученным стабилизированным значениям P_i и S_i по известным формулам (4) при каждой ступени отрицательной температуры θ_i можно вычислить длительное сцепление мерзлого глинистого грунта C_i .

Рис. 28. Изменение сжимающей нагрузки, осадки и сцепления во времени при испытаниях шаровым штампом: а – $P = f(t)$; б – $S = f(t)$; в – $C = f(t)$

Такое объединение методов Н.А. Цытовича и С.С. Вялова позволило получить следующие преимущества:

- повысить точность и сопоставимость испытаний, т.к. результаты опытов интерпретируются при практически одинаковом отношении S/D , где необходимое значение осадки задается;
- существенно повысить информативность испытаний, в частности в ходе одного опыта определить значение сцепления мерзлых грунтов при различных температурах;
- более поздние разработки, выполненные в ИПРИМ РАН, позволили существенно усовершенствовать методику Н.Ф. Чертоляса [6] и более корректно определять из опытов с помощью шарового штампа в режиме ползучести-релаксации отдельно значение удельного сцепления и угла внутреннего трения. Кроме этого, были разработаны методики определения коэффициента вязкости при различных значениях отрицательных температур

или при различной влажности в ходе одного опыта [6].

Методика сдвиговых испытаний в режиме ползучести-релаксации (развитие динамометрического метода С.С. Вялова) [6, 16]. Испытания, в отличие от классических, ведут в режиме задаваемых деформаций, но не доводя образец до разрушения. Идея новой методики сдвиговых испытаний заключается в следующем: к образцу (или целику) прикладывается вертикальная сжимающая нагрузка σ_i непрерывно или ступенями, в зависимости от программы испытаний (рис. 29).

Рис. 29. Схема испытания целика на сдвиг (а), программа нагружения и результаты испытаний (б)

Далее к образцу (целику) ступенями или непрерывно прикладывается сдвигающая нагрузка τ . Нагружение осуществляется через упругий элемент, в качестве которого может служить динамометр большой жесткости с винтом или гидравлический домкрат.

Приложение нагрузки продолжается до достижения предельных деформаций, о чем судят по ряду особых критериев. Далее производят сброс вертикального давления до σ_2 . Причем ступень σ_2 и последующие ступени σ выдерживаются такое время, которое необходимо для стабилизации сдвиговых напряжений τ_i и перемещений γ_i . Стабилизация сдвиговых напряжений τ_i и перемещений γ_i свидетельствует о том, что внешние сдвигающие силы τ_i пришли в равновесие с внутренними силами сопротивления грунта сдвигу при данном значении сжимающих напряжений σ_2 . После этого вновь снижают сжимающую нагрузку до σ_3 . Равновесие системы при этом нарушается и восстанавливается тогда, когда сдвигающая нагрузка, вследствие процесса релаксации, уравнивается силами сопротивления грунта сдвигу при другой сжимающей нагрузке σ_3 . Далее аналогичным образом производят разгрузку вертикального давления ступенями до нуля.

В результате испытаний получают несколько пар значений σ_i и соответствующих им стабилизированных сдвиговых напряжений τ_i . По полученным данным строят график в осях τ – σ , который будет близок к кривой длительной прочности. По графику определяют параметры длительной

прочности при сдвиге φ_∞ и C_∞ (рис. 30). Для автоматизации процесса записи и обработки результатов можно легко оснастить нагрузочные устройства цифровыми датчиками измерения силы и вывести сигналы на компьютер.

Рис. 30. Зависимость $\tau_{длит} = f(\sigma)$ (а) и сдвиговой прибор ВСВ-25м (б), оснащенный устройством для автоматического нагружения, измерений и обработки данных от универсальной установки UTS-10

Методика для определения параметров длительной прочности мерзлых грунтов при различных отрицательных температурах в режиме ползучести-релаксации по результатам одного опыта [5]. Вышеописанный подход позволяет в ходе одного опыта не только определить параметры длительной прочности мерзлых грунтов при фиксированной температуре, но и определить их значение при различных температурах в ходе одного опыта. М.В. Королевым и группой авторов из МИСИ-МГСУ еще в 1987–1990 гг. были разработаны способы определения параметров длительной прочности при различных значениях отрицательных температур в режиме ползучести-релаксации для сдвиговых, трехосных испытаний [6, 17]. Программа нагружения для получения параметров длительной прочности грунтов при испытаниях на сдвиг при различных отрицательных температурах приведена на рис. 31.

Рис. 31. Кривые длительной прочности, программа (а) и процесс испытаний (б) мерзлых грунтов при различных температурах θ_1 , θ_2 , θ_3 в климатической камере на стандартном сдвиговом приборе ВСВ-25-м

Основная идея этих испытаний заключается в том, что по вышеописанной методике испытаний на сдвиг в режиме ползучести-релаксации, в некотором диапазоне вертикально сжимающих напряжений σ_1 – σ_2 , сдвиговые испытания проводят при максимальном значении отрицательной температуры θ_1 . Получив отрезок кривой длительной прочности при данной температуре, значения отрицательных температур изменяют до величины θ_2 . При данной температуре также определяют отрезок кривой длительной прочности. Последнее испытание можно провести при значении температуры $\theta_3 = 0$.

Описанные методики в режиме ползучести–релаксации были многократно экспериментально проверены на различных грунтах в полевых и лабораторных условиях путем сопоставления с результатами по стандартным методикам. Некоторые из них использовались на реальных объектах и показали огромный экономический эффект [6].

Описанный подход был использован в ИПРИМ РАН для разработки методик определения параметров длительной прочности и деформируемости при различных температурах в ходе одного опыта не только при сдвиговых испытаниях и испытаниях шаровым штампом, но и иных схемах нагружения: стабиллометрических испытаниях, при определении несущей способности свай [2, 6].

Данные методики позволяют на порядки сократить время, стоимость и трудоемкость испытаний. Методики доступны к реализации в полевых и лабораторных условиях при различных видах испытаний (сдвиговых, на кручение, трехосных и др.). Позволяют с достаточной для практических целей точностью определять параметры длительной прочности и ползучести мерзлых грунтов и грунтов, обладающих реологическими свойствами, что открывает широкие возможности для их массового использования при решении различных задач, что особенно актуально в связи с активным строительством и изменением климата в криолитозоне.

Способ и устройство кольцевого ребристого штампа для определения параметров прочности мерзлых грунтов при различных значениях отрицательных температур, в т.ч. в коротких скважинах

С целью снижения трудоемкости подготовительных работ по изготовлению целика кольцевой формы, при исследовании мерзлых полускальных грунтов, слагающих борта котлована строящейся Вилуйской ГЭС-3, была разработана и апробирована инвентарная установка кольцевого нагружения – кольцевой ребристый штамп, где касательная нагрузка передавалась на массив с помощью ребер, закрепленных на металлическом кольцевом штампе [6] (рис. 32).

С помощью кольцевого ребристого штампа можно проводить испытания в режиме ползучести-релаксации и проводить опыты по определению параметров прочности при различных температурах в ходе одного эксперимента.

Приведена траектория нагружения по определению параметров длительной прочности мерзлых грунтов при различных значениях

отрицательных температур в ходе одного опыта с помощью кольцевого ребристого штампа в режиме ПРР (рис. 33).

Рис. 32. Полевые испытания кольцевым ребристым штампом диаметром 0,5 м в шурфе (а, б) и схема инвентарного кольцевого ребристого штампа (в)

Рис. 33. Траектория нагружения по определению параметров длительной прочности мерзлых грунтов при различных значениях отрицательных температур в ходе одного опыта с помощью кольцевого ребристого штампа в режиме ПРР

Как упоминалось выше, недостатком вышеописанного способа является то, что он не позволяет определить параметры прочности мерзлых грунтов при различных значениях отрицательных температур в скважинах и открытых шурфах. Обычным ребристым штампом возможно только проведение испытаний при фиксированном значении температуры массива, изменяя ее во всей штольне или требуется проводить опыты в морозильной камере.

Если же изменять температуру мерзлого массива грунта с поверхности, с помощью нагревательных или охлаждающих устройств под подошвой ребристого штампа, то в нем возникает неравномерное температурное поле. Это не позволяет осуществлять сдвиг кручением грунта с одинаковой температурой при помощи прямоугольных ребер штампа. Для создания равномерного температурного поля при изменении температуры его поверхности разработано устройство (рис. 34).

Рис. 34. Принципиальная схема кольцевого ребристого штампа для испытания мерзлых грунтов при различных значениях отрицательных температур в режиме ползучести–релаксации. *Обозначения:* 1 – кольцевой ребристый штамп; 2 – прямоугольные ребра, внедряемые в грунт; 3 – балка; 4 – домкраты для создания крутящего момента; 5, 6, 7 – баки с теплоносителем; 8 – подводящие и отводящие трубопроводы; 9 – бак с нагревающим устройством и теплоносителем; 10 – насос; 11 – линии равных температур

Однако это громоздкое устройство не позволяет проводить испытания в коротких скважинах. С целью усовершенствования метода были проведены численные температурные расчеты изменения температуры грунта в массиве при изменении ее под кольцевой подошвой штампа. Расчеты проводились с помощью программного комплекса Abacus.

Результаты расчетов представлены в графической форме на рис. 35.

Как показали проведенные расчеты, форма линии равных температур при таком нагреве одинакова и не зависит от теплофизических свойств грунта. Это обстоятельство дает возможность существенно упростить устройство кольцевого ребристого штампа для определения механических свойств грунта при различных температурах и отказаться от внешней и внутренней вкладок, которые были необходимы для создания равномерного температурного поля.

Было предложено ребра штампа делать не в виде прямоугольных пластин, а округлой формы, повторяющей кривую линии равных температур, которая формируется под подошвой кольцевого штампа при ее нагревании. Тогда при приложении крутящей нагрузки сдвиг грунта будет осуществляться точно по границе слоя грунта с одинаковой температурой. На рис. 36 показана принципиальная схема предлагаемого устройства. Это позволяет отказаться от круговой внутренней и кольцевой внешней камер, которые служат для создания более равномерного температурного поля в грунте, упростить конструкцию устройства и применять его для испытаний грунта в коротких скважинах.

а

б

в

Рис. 35. Результаты численных расчетов изменения изолиний температуры в массиве мерзлого грунта при ее изменении на поверхности и под подошвой кольцевого штампа

Рис. 36. Принципиальная схема кольцевого ребристого штампа для испытания мерзлых грунтов при различных температурах в коротких скважинах. *Обозначения:* 1 – подошва кольцевого штампа, 2 – овалыные ребра, 3 – бак с теплоносителем, 4 – подводящий и отводящий трубопроводы, 5 – вал штампа для передачи крутящего момента и вертикальной нагрузки

Используя общий принцип испытания в режиме задаваемых деформаций без разрушения грунта в ИПРИМ РАН разработаны новые методики испытаний в ползуче-релаксационном режиме нагружения (табл. 3.)

Таблица 3

Новые методики испытаний в ползуче-релаксационном режиме нагружения, разработанные
в ИПРИМ РАН [6]

№	Название способа, методики	Определяемые характеристики
1	Методика сдвиговых испытаний в режиме ПРР, в т.ч. при различных температурах (полевой сдвиговой прибор ВСВ – 25 м, климокамера)	Параметры длительной прочности грунта (φ_{∞} и C_{∞}) при различных температурах θ_1 , θ_2 , θ_3
2	Методика трехосных испытаний в режиме ПРР, в т.ч. при различных температурах (стабилометр, прибор трехосного сжатия, климокамера)	Параметры длительной прочности грунта (φ_{∞} и C_{∞}) при различных температурах θ_1 , θ_2 , θ_3
3	Методика испытания модифицированным прибором шарового штампа в режиме ПРР, в т.ч. при различных температурах (модифицированный прибор шариковой пробы, климокамера)	Длительное удельное (шариковое) сцепление (C_{∞}) при различных температурах θ_1 , θ_2 , θ_3
4	Методика и прибор для определения коэффициента вязкости грунта с помощью испытания способом шарового штампа в режиме ПРР (модифицированный прибор шариковой пробы, климокамера)	Коэффициент вязкости при различных температурах θ_1 , θ_2 , θ_3
5	Способ и методика испытания кручением с помощью кольцевого ребристого штампа в режиме ПРР (полевая установка КРШ)	Параметры длительной прочности грунта (φ_{∞} и C_{∞}) при различных температурах θ_1 , θ_2 , θ_3 . Параметры деформируемости: длительный модуль деформации (E_{∞}) и длительный модуль сдвига (G_{∞}) при различных температурах θ_1 , θ_2 , θ_3
6	Методика и установка для определения параметров деформируемости грунтов плоским штампом	Параметры деформируемости: длительный модуль деформации (E_{∞}) и при различных температурах θ_1 , θ_2 , θ_3
7	Способ, методики и установки для определения несущей способности свай (раздельно по боковой поверхности и под нижним концом), в замороженных в грунт при различных температурах	Несущая способность свай, сопротивление под нижним концом и по боковой поверхности при различных температурах θ_1 , θ_2 , θ_3

Расчетные численные и аналитические методы определения параметров механических свойств грунтов

С развитием численных методов моделирования для определения механических характеристик масштабно неоднородных грунтов все больше значение приобретают расчетные методы. На примере рассмотрен один из таких методов, разработанных в МИСИ-МГСУ в 1985 г.

Принцип этого метода заключается в следующем. На основе данных инженерно-геологических изысканий разрабатываются так называемые « типовые структуры », отражающие особенности строения изучаемых зон массива – содержание элементов неоднородности, их размеры, взаимное расположение, ориентация и т.п. Механические свойства отдельных элементов неоднородности (мягкого заполнителя и скальных глыб в мерзлом, либо талом состоянии, трещин различного порядка с заполнителем или без заполнителя, льда и т.п.) изучаются экспериментально в полевых, либо лабораторных условиях. Обычно это не вызывает каких-либо особых технических трудностей, т.к. условие представительности исследуемого объема в масштабе отдельных элементов неоднородности удовлетворяется при использовании стандартных методов. Затем, для определения характеристик механических свойств всей типовой структуры математически моделируется нагружение сколь угодно больших областей массива, чтобы удовлетворить условие представительности объема испытаний при любых размерах элементов неоднородности (рис. 37).

Рис. 37. Схема иерархических типовых структур массива левого берега р. Виллой
в створе проектируемого гидроузла

В основе математического эксперимента лежит решение задачи об определении НДС зоны массива на каждой ступени нагружения. Эта задача решается методом конечных элементов в линейной, либо нелинейной постановке. Точность математического эксперимента обусловлена несколькими

факторами: точностью определения исходных данных, т.е. характеристик механических свойств отдельных элементов неоднородности; адекватностью описания механического поведения элементов неоднородности под нагрузкой при решении задачи методом конечных элементов; достоверностью данных ИГ изысканий при разработке типовых структур.

Проиллюстрирована идея расчетно-экспериментального метода и последовательность необходимых действий на одном примере.

Пример. Задача – определить модуль деформации массива грунта. В результате обработки и обобщения данных ИГ изысканий получена типовая структура, показанная на рис. 37: верхний слой представляет собой крупные блоки алевролитов (1) и суглинистый заполнитель (2), нижний слой сложен известняками (3). Характерный размер блока алевролита не превышает 2 м. В математическом эксперименте будет моделироваться нагружение бесконечной полосовой нагрузкой (бесконечный гибкий штамп) в условиях плоской деформации.

На основе типовой структуры разрабатывается расчетная схема – сетка разбивки на конечные элементы. С достаточной для инженерных целей точностью условие представительности можно считать выполненным при отношении размера штампа к характерному размеру элемента неоднородности, равном 6. Таким образом, ширина штампа должна быть не менее 12 м. Для снижения влияния граничных условий взято расстояние от оси штампа до боковых границ расчетной схемы. В качестве граничных условий приняты: по нижней границе – жесткая заделка, по боковым границам – шарнирно-подвижное крепление. Разбивка на конечные элементы выполняется таким образом, чтобы в пределах каждого конечного элемента грунт был однородным. Деятельность разбивки вблизи свободной поверхности и под полосой нагружения выше (т.е. размеры элементов – меньше), по мере удаления к границам деятельность разбивки уменьшается, т.е. размеры элементов увеличиваются.

1. Экспериментально определяются значения модуля деформации и коэффициента Пуассона трех типов элементов неоднородности – алевролита, суглинка и известняка в заданном диапазоне нагрузок.

2. Математически моделируется нагружение массива по заданной траектории. На каждом шаге нагружения методом конечных элементов решается задача определения НДС массива в линейной либо нелинейной постановке в зависимости от экспериментальных данных, полученных в п. 2.

3. Анализ и обработка результатов математического эксперимента. На каждом шаге нагружения анализируется эпюра перемещений свободной поверхности и напряженное состояние массива. В результате выбирается расчетная схема, в объеме которой будут вычисляться модули деформации массива на каждом шаге нагружения – например, схема линейно деформируемого слоя ограниченной мощности. В рамках принятой расчетной схемы по перемещениям поверхности вычисляется модуль деформации массива

грунта на каждом шаге нагружения.

В последние годы в ИПРИМ РАН значительно усовершенствованы подобные численные и аналитические методы моделирования, позволяющие определить механические свойства масштабно-неоднородных гетерогенных грунтов, в т.ч. и в процессе их оттаивания.

Метод испытаний грунтов вращательным срезом с помощью криволинейных крыльчаток [14] базируется на одном из наиболее простых и эффективных способов определения параметров прочности грунтов – испытании на сдвиг кручением при помощи лопастной крыльчатки. Основным недостатком классического способа является то, что он не позволяет определить отдельно значения параметров прочности грунтов – угла внутреннего трения φ и удельного сцепления C . В результате значение удельного сцепления C этим методом можно определить только для грунтов, обладающих малым значением угла внутреннего трения φ .

Основа предлагаемого метода заключается в том, что внедряемая в грунт крыльчатка имеет в сечении не прямые, а криволинейные (изогнутые) лопасти, выпуклые в одну сторону по направлению вращения и вогнутые в другую (рис. 38).

Рис. 38. Крыльчатка с криволинейными лопастями (а) со схемами распределения напряжений при кручении по часовой стрелке (б) и против часовой стрелки (в)

Такая геометрия крыльчатки позволяет при кручении в одну сторону максимально снизить возникающие неконтролируемые радиальные сжимающие напряжения к цилиндрической поверхности среза, а при кручении в противоположную сторону увеличить значение этих напряжений (по сравнению с крыльчаткой с прямолинейными лопастями). Определив величину возникающих радиальных напряжений при кручении криволинейной крыльчатки в разные стороны, легко определить угол внутреннего трения φ и удельное сцепление C . На рис. 39 показаны траектории нагружения при испытаниях обычной крыльчаткой и крыльчаткой с криволинейными лопастями.

Рис. 39. Траектории нагружения при испытаниях обычной крыльчаткой и крыльчаткой с криволинейными лопастями

Новый способ определения параметров прочности связных грунтов путем испытания монолитов вращательным срезом с радиальной пригрузкой [3] сочетает простоту технической реализации и возможность в полевых условиях быстро и надежно определить отдельно угол внутреннего трения φ и удельное сцепления грунта C . Извлеченный из скважины монолит грунта (рис. 40) помещают в металлическую цилиндрическую обойму с внутренним диаметром равным диаметру монолита. Монолит можно извлекать в результате колонкового бурения.

а

б

в

Рис. 40. Извлечение грунта из скважины при помощи колонкового бурения (а); транспортировка образцов в лабораторию (б); испытание в приборе монолита грунта после помещения в металлическую цилиндрическую обойму (в)

Обойма разделена три на сектора с центральными углами, равными 180° , 90° , 90° (рис. 41). Большой сектор 180° неподвижно закреплен на станине, а два малых сектора 90° имеют возможность радиальных перемещений. Сектора неподвижно фиксируют, монолит грунта по торцам подрезают так, чтобы он весь оказался внутри обоймы, после чего в центр оси монолита внедряют (задавливают) лопастную крыльчатку. К внедренной в грунт крыльчатке, через шток, прикладывают ступенчато возрастающий крутящий момент.

Максимальное значение крутящего момента, при заданном уровне радиальных сжимающих напряжений, фиксируют и по нему определяют максимальное сдвигающее напряжение. По полученным из двух опытов парам значений определяют параметры прочности грунта – угол внутреннего трения φ и удельное сцепление C .

На основе этих разработок и новых методик был создан универсальный мобильный комплекс для геомеханических испытаний [6, 7] (табл. 4). Комплекс, в различных комбинациях, может использоваться при проведении геомеханических исследований для малоэтажного строительства, в труднодоступных местах, при ИГ изысканиях под протяженные линейные объекты (для мониторинга берегов водохранилищ, контроля качества насыпей дорог и др.), при проведении обследований оснований и фундаментов реконструируемых зданий (см. рис. 41).

Рис. 41. Примеры использования комплекса

Таблица 4
Комплекс оборудования для проведения экспресс-испытаний по определению механических свойств грунтов

База	Наименование	Назначение	Кол-во, шт.	Вес, кг
Бур геолога	Комплект штанг	– проходка скважины; – универсальная база для насадок и передачи нагрузок	1	10,0

Материалы Общероссийской научно-практической конференции и выставки
«Полевые и лабораторные методы исследования грунтов – проблемы и решения»,
г. Москва, 21 мая 2021 г.

База	Наименование	Назначение	Кол-во, шт.	Вес, кг
	Рычаг бура с возможностью измерения крутящего момента	– проходка скважины; – измерение крутящего момента; – измерение статического давления	1	3,0
	Буровой шнек	– проходка скважины; – отбор образцов грунта нарушенного сложения	1	0,5
	Пробоотборник (Ø 32 мм)	– отбор образцов грунта ненарушенного сложения	1	0,5
	Прибор вращательного среза (насадка)	– определение удельного сцепления грунта; – определение угла внутреннего трения грунта	1+1	1,0
	Зонд	– определение удельного сопротивления грунта под наконечником зонда при статическом зондировании; – определение условного динамического сопротивления грунта	1	0,3
	Обсадные трубы ПВХ	– защита стенок скважин	5	1,0
	Устройство для создания динамической нагрузки	– создание динамической нагрузки	2	10,0
Бур (Ø 200 мм)	Комплект штанг	– проходка скважины; – универсальная база для насадок и передачи нагрузок	1	2,0
	Буровой шнек	– проходка скважины; – отбор образцов грунта нарушенного сложения	1	3,0
	Кольцевой ребристый штамп	– определение удельного сцепления грунта; – определение угла внутреннего трения грунта	1	3,0
	Шаровый штамп	– определение удельного сцепления связного грунта;	1	1,0
	Прессиометр	– определение модуля деформации грунта	1	1,0
	Пробоотборник с поперечной площадью образца 40 см ²	– отбор образцов грунта ненарушенного сложения для испытаний в приборе BCB 25M	1	1,0
	Пробоотборник Ø 120 мм	– отбор образцов грунта ненарушенного сложения для испытаний в лабораторном приборе вращательного среза	1	2,0

База	Наименование	Назначение	Кол-во, шт.	Вес, кг
Приборы	Прибор одноплоскостного среза ВСВ 25М	– определение удельного сцепления грунта; – определение угла внутреннего трения грунта	1	10,0
	Лабораторный прибор вращательного среза	– определение удельного сцепления грунта; – определение угла внутреннего трения грунта	1	8,0
Прочее оборудование	Набор гирь	– создание статической нагрузки	10	20,0
	Анкер с рычагом	– передача статической нагрузки на комплект штанг	1	10,0
	Домкрат 3 т	– сдвиг целиков грунта	1	2,0
	Металлическое кольцо с упором (Ø 200 мм)	– распределение напряжений в целике при сдвиге	1	3,0
	Динамометр	– измерение сдвигающей нагрузки	1	2,0
	Система измерения перемещений	– измерение перемещений целика	1	1,0
	Измеритель уровня грунтовых вод	– определение уровня грунтовых вод	1	1,0

Впервые комплекс оборудования использовался в 2017 г. при выполнении значительного объема геомеханических работ на Угличском водохранилище и показал высокую эффективность [7].

Выводы

В настоящее время перед РФ встают новые глобальные «вызовы», к которым относятся деградация мерзлоты, уменьшение запасов пресной воды на суше, рост мегаполисов. Существующие методы геомеханических испытаний не в состоянии обеспечить потребности надежного проектирования, строительства и реконструкции объектов в этих сложных меняющихся условиях.

Эти обстоятельства диктуют необходимость существенного изменения подходов к ИГ изысканиям и требуют целенаправленной разработки более технологичных эффективных и информативных новых методов, способов, методик и оборудования для их проведения.

1. Разработки новых, более технологичных способов и схем геомеханических испытаний, которые легко реализовать в полевых условиях.

2. Разработки новых ускоренных и более информативных методик геомеханических испытаний, позволяющих быстро и с достаточной для практических целей точностью, определять механические характеристики

грунтов при изменяющихся внешних условиях (при различных значениях влажности, температуры, при различных концентрациях загрязнений, динамических воздействиях и др.).

3. Разработки мобильных комплексов для проведения геомеханических экспресс-испытаний в труднодоступных местах.

4. Увязки возможностей перспективных методов исследований и расчетных программ и объединение их в эффективные взаимодополняющие расчетно-изыскательские комплексы.

Однако, без использования методологии инноваций – это будет представлять практически невыполнимую задачу. Поэтому необходимо разработать основы методологии инноваций в сфере геомеханических испытаний, элементами которой могут быть: использование законов эволюции систем, методы системного анализа, разработанные основы рейтинговой системы оценки эффективности методов, классификация этих методов.

5. В ИПРИМ РАН на основе предлагаемой методологии созданы новые эффективные способы и методики определения механических характеристик грунтов, позволяющие в десятки раз повысить эффективность, точность и информативность геомеханических испытаний.

Список литературы

1. Абовский Н.П. Творчество: системный подход. Законы развития. Принятие решений, 2-е изд., доп. М.: СИНТЕГ, 1998. 294 с.
2. Власов А.Н., Королев М.В., Королев П.М. Способ определения несущей способности свай: патент на изобретение РФ № 2629508. Заявка № 2015156942. Приоритет от 30.12.2015.
3. Власов А.Н., Чунюк Д.Ю., Куцевич О.И., Королев М.В. Способ определения прочности грунтов испытанием кернов вращательным срезом: патент на изобретение РФ № 2636512. Заявка № 2016152280. Приоритет от 29.12.2016.
4. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: учеб. пособие для студентов по спец. «Промышленное и гражданское строительство» и «Гидрогеология и инженерная геология». М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
5. Королев М.В. Определение характеристик деформируемости трансверсально-изотропных полускальных грунтов в условиях их естественного залегания: дисс. ... канд. техн. наук. М.: МИСИ, 1991. 259 с.
6. Королев М.В. Системные инновации в методах исследования механических свойств грунтов. М.: ИПРИМ РАН, 2018. 376 с.
7. Королев М.В., Власов А.Н., Остякова А.В., Лупанова И.А. Угличское водохранилище: переработка берегов, мониторинг, геомеханические исследования. М.: ИПРИМ РАН, 2017. 247 с.

8. Определение реологических свойств грунтов методом релаксации / В.Н. Кутергин, Р.Г. Кальберген, Ф.С. Карпенко, А.Р. Леонов, В.П. Мерзляков // Механика грунтов. 2013. № 1. С. 2–5.
9. Осипов В.И. Мегаполисы под угрозой природных катастроф // Вестник Российской академии наук. 1996. Т. 66. № 9. С. 771.
10. Осипов В.И., Еремина О.Н., Козлякова И.В. Оценка экзогенных опасностей и геологического риска на урбанизированных территориях (обзор зарубежного опыта) // Геоэкология. 2017. № 3. С. 3–15.
11. Остякова А.В., Королев М.В., Королев П.М. Особенности Угличского водохранилища и система его мониторинга // Труды Международной научно-практической конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосбросов». Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2015. С. 97–102.
12. Примеры и причины аварий сооружений. Вопросы оценки и обеспечения качества строительных объектов, надежной работы оснований и фундаментов в условиях меняющихся природных и техногенных воздействий / М.В. Королев, В.Н. Егоров, А.Н. Власов, В.В. Знаменский, О.И. Куцевич, А.Е. Икрамова. М.: Сам Полиграфист, 2020. 215 с.
13. Рац М.В. Структурные модели в инженерной геологии. М.: Недра, 1973. 216 с.
14. Способ определения параметров прочности грунта методом вращательного среза и устройство для его реализации: патент на изобретение РФ № 2646263 / М.В. Королев, А.Н. Власов, Д.Ю. Чунюк, О.И. Куцевич, Д.Б. Волков-Богородский. Заявка № 201615814/03(083053). Приоритет от 28.12.2016.
15. Труфанов А.Н. Определение параметров консолидации грунта методом релаксации напряжений // Инженерные изыскания. 2015. № 12. С. 18–21.
16. Ухов С.Б., Королев М.В. Способ определения длительной прочности горных пород: авторское свидетельство СССР № 1323913. Опубликовано в Бюллетене изобретений № 25 от 15.07.1987.
17. Ухов С.Б., Королев М.В., Брызгалин Ю.В. Способ определения параметров длительной прочности горных пород: авторское свидетельство СССР № 1610386. Опубликовано в Бюллетене изобретений № 44 от 30.11.1990.
18. Ухов С.Б., Королев М.В., Монастырский А.Е. Способ определения длительного сцепления мерзлых грунтов: авторское свидетельство СССР № 1561032. Опубликовано в Бюллетене изобретений № 16 от 30.04.1990.

M.V. Korolev

Institute of Applied Mechanics, Russian Academy of Sciences; Moscow State (National Research) University of Civil
Engineering, Moscow, m-korolev2009@yandex.ru

METHODOLOGICAL ISSUES FOR IMPROVING GEOMECHANICAL TESTING

Abstract. This publication (in three parts) is devoted to the methodological issues of geomechanical tests' improvement. In the **first part** new relevant “challenges” facing a building complex of the Russian Federation are considered. It is shown that the currently known geomechanical tests' methods are not able to carry out effectively the huge volume of researches necessary for the decision of new arisen problems. In the **second part** the methodological issues of geomechanical test methods' improvement are considered. The basic elements are the analysis of trends in the improvement of methods, the use of general laws of evolution of technical systems in the development and improvement of new methods; use in the development and improvement of methods and algorithms for system analysis; the need to adopt a unified terminology and a unified classification of geomechanical tests' methods; the use of the principle of a rational balance between their cost and accuracy in the improvement and development of new methods of geomechanical tests, synchronization of the elements of the “survey – geomechanical calculations – design” system; inclusion of computational methods and variational calculations in the geomechanical survey complexes to optimize the research program. In the **third part** some examples of principally new test methods and techniques developed with the use of the proposed methodological framework, which in comparison with the existing methods are much more informative and effective and which in contrast to the known methods can allow to cope with new “challenges” are presented.

Key words: geomechanical tests; degradation of permafrost; fresh water supplies; growth of megacities; methodology; method; way; technique; model; scheme; installation; methods' classification; systems evolution laws; system analysis; cost and accuracy of tests; systemic targeted innovation; creep-relaxation loading mode; test procedures at various temperatures; mobile multipurpose installation; design complexes.

Локтев А.С.¹, Вознесенский Е.А.²

¹ООО «Центр морских исследований МГУ имени М.В. Ломоносова», г. Москва, andreiloktev@mail.ru

²Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН; МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет,
кафедра инженерной и экологической геологии, г. Москва, arnoldych@gmail.com

ИСПЫТАНИЕ ГРУНТОВ ШЕЛЬФА СТАТИЧЕСКИМ ЗОНДИРОВАНИЕМ. ТРЕБОВАНИЯ И ПРАКТИКА

Аннотация. Статическое зондирование (включает разные виды и модификации) является стандартным методом исследований водонасыщенных грунтов шельфа и позволяет определять их свойства в ненарушенном сложении. Такие виды полевых исследований широко распространены в общемировой практике, но не имеют значительного применения на российском рынке. Отсутствие отечественных оборудования и современной нормативной базы являются основными причинами такого положения. В настоящее время ведется разработка нового национального ГОСТ «Морские исследования грунтов» на базе международного стандарта ISO 19901-8:2014 “Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures – Part 8: Marine soil investigations”. Новый российский стандарт будет содержать требования в т.ч. к подготовке, калибровке, проведению различных модификаций испытаний грунтов статическим зондированием.

Ключевые слова: статическое зондирование; шельф; грунт; поровое давление; зонд; удельное сопротивление под конусом; пьезодатчик.

Основная задача инженерно-геологических изысканий – определение строения грунтовой толщи и получение достоверных характеристик свойств и параметров выделенных грунтов. При выполнении инженерно–геологических изысканий на шельфе необходимо учитывать особенности сложения и распространения отложений, в частности, их водонасыщенное и неконсолидированное состояние. Мощность «слабых» грунтов может достигать нескольких десятков метров; а текуче- и мягкопластичные глинистые отложения имеют широкое распространение и составляют большую часть шельфа (вне зон выноса и аккумуляции аллювиальных песков, например). Вследствие указанных факторов отбор и получение ненарушенных проб из таких толщ является сложнореализуемой задачей и требует специальных технологий, оборудования, судов. И это, в конечном итоге, влияет на результаты инженерно-геологических изысканий, их достаточность и достоверность.

Нормативные требования в области инженерно-геологических изысканий на шельфе для строительства указывают на необходимость испытаний грунтов «в массиве» на детальном стадиях «не менее чем в 50% выработок» [4, 5]. Однако практика показывает, что полевые испытания грунтов в таком объеме не выполняются, испытания делаются скорее эпизодически, при подавляющем объеме бурения. Пробоотбор, хранение и транспортировка пригодных (ненарушенных) проб из водонасыщенных глинистых грунтов и песков не всегда осуществимы, поэтому получение достоверных характеристик прочностных и деформационных свойств из них может также оказаться нереализуемым или потребовать специальной подготовки искусственно сформированных проб.

Статическое зондирование электрическим наконечником (СРТ) является самым распространенным видом полевых испытаний на шельфе [3, 8], может выполняться достаточно быстро и эффективно. По способу выполнения различают скважинное и донное СРТ. Первое, как правило, направлено на получение информации о строении и свойствах на максимальную глубину (при возможности проходки выработки разбуриванием сплошным забоем и/или с отбором керна до требуемой глубины выполнения испытаний), т.е. до 100 м и более. При донном СРТ обычно используется забортная установка с донной рамой (воспринимающей реактивную силу при задавливании колонны с зондом). Как правило, глубина пенетрации такими установками не превышает 10–20 м и определяется глубиной моря и задавливающим усилием установки, а зондировочная колонна наращивается в процессе ее внедрения. Донные СРТ часто применяются при инженерно-геологических изысканиях вдоль линейных сооружений или под гравитационные основания.

Конструкция и скорость пенетрации зонда, расположенного в основании колонны, регламентируются различными международными и российскими стандартами и, по сути, идентичны, в частности, скорость задавливания при выполнении испытаний статическим зондированием должна составлять 20 ± 5 мм/с [6, 7] или $1,2 \pm 0,3$ м/мин [1]. При такой скорости испытание на глубину 10 м может выполняться за 10–15 мин, не считая времени на спуск и постановку на дно, подъем оборудования, его обслуживание.

Для инженерно-геологических изысканий на шельфе следует использовать зонды, снабженные датчиками порового давления в основании конуса (u_2), такие тесты обычно обозначаются как РСРТ или СРТУ. Измерение порового давления важно при определении параметров грунтов, т.к. его величина может быть соизмеримой с величиной удельного сопротивления под конусом зонда и недостаточный учет такого влияния существенно исказит результат испытаний. Проведение СРТ испытаний без использования датчика порового давления возможно только для целей расчленения грунтовой толщи (определении мощности и последовательности слоев). Кроме стандартного испытания задавливанием зонды РСРТ могут быть применяться для диссипационных тестов (dissipation test). Такой вид испытаний предполагает измерение рассеивания порового давления в прилегающем к зонду грунте с последующим определением его деформационных характеристик.

Актуальным для шельфа также является измерение температуры грунтов, особенно в арктических морях, в районах распространения субаквальной мерзлоты. Для этого используется специальный зонд, снабженный температурным датчиком. Технология измерений аналогична диссипационным испытаниям, когда зонд выдерживается на определенной глубине под дном моря с целью получения достаточного ряда наблюдений параметра для закономерной аппроксимации измеряемого значения. Определение температуры является обязательным для определения, картирования многолетнемерзлых грунтов (ММГ), о чем иногда забывают многие исследователи и изыскатели, т.к. в

отечественной практике к «мерзлым» относятся грунты, «имеющие отрицательную или нулевую температуру, содержащие видимые ледяные включения и/или лед-цемент» [2].

Новый ГОСТ «Морские исследования грунтов», разрабатываемый на основе ISO 19901-8:2014 [6], будет содержать требования и рекомендации к выполнению различных геотехнических исследований в составе инженерно-геологических изысканий на шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений (МНГС), т.е. детализирует так называемые инвазивные, деструктивные методы (в отличие от неинвазивных геофизических, не приводящих к нарушению грунтовых толщ и массивов). Разрабатываемый ГОСТ включает ряд положений и требований, не отражающихся в существующих национальных стандартах.

В частности, отложения шельфа являются достаточно чувствительными, а диапазон измеряемых параметров достаточно узким, поэтому необходимо использовать зонды с заданными характеристиками, допустимыми погрешностями измерений, что часто совсем не учитывается в реальной практике (как следствие, например, одними и теми же зондами выполняют испытания грунтов в диапазоне от текучих глин до полутвердых или валунных суглинков). В таблице приведены классы применимости зондов с количественными ограничениями их использования, которые отражают указанные требования.

Таблица

Точность значений параметров СРТ/СРТУ для разных классов применимости

Класс применимости	Тип испытания	Измеряемый параметр	Допустимая минимальная погрешность
1	СРТУ	Удельное сопротивление грунта под конусом	35 кПа или 5%
		Удельное сопротивление грунта на муфте трения	5 кПа или 10%
		Поровое давление	25 кПа или 5%
2	СРТ или СРТУ	Удельное сопротивление грунта под конусом	100 кПа или 5%
		Удельное сопротивление грунта на муфте трения	15 кПа или 15%
		Поровое давление	50 кПа или 5%
3	СРТ или СРТУ	Удельное сопротивление грунта под конусом	200 кПа или 5%
		Удельное сопротивление грунта на муфте трения	25 кПа или 15%
		Поровое давление	100 кПа или 5%

Также в нормативе планируется установить фактические требования к точности измерения вертикальных расстояний (включая глубину моря, расстояния между точками зондирования по вертикали, определения кровли и подошвы слоев и пр.). Это существенный фактор, влияющий на достоверность результатов, особенно для работ с плавучих установок и на шельфе открытых морей, где на некоторых участках суточные колебания уровня моря могут составлять 3–5 м (Баренцево и Печорское моря) и даже достигать 13,5 м (Охотское море). При достаточной глубине СРТ на точность может также влиять отклонение колонны от вертикали (при допустимой величине отклонения 15°).

Важными положениями также будут являться регламентирование измеряемых и предоставляемых данных и параметров при выполнении статического зондирования, форма и порядок предоставления результатов. Текущая практика и существующие требования очень неопределенные в этих вопросах. Однако практика показывает, что часто приходится не просто проверять полученные результаты, но и выполнять их переобработку (в силу недостаточного учета каких-то факторов, неверного их применения, недостоверности данных и пр.). При отсутствии необработанных («сырых») данных в нужном (доступном для использования) цифровом формате такие действия оказываются невыполнимыми. Даже использование нерепрезентативного масштаба и формы предоставления результатов могут оказать существенное влияние на их представительность, «читаемость», эффективность. Имеет место такая практика, когда исполнитель даже не знает алгоритма обработки и интерпретации данных, используя некое программное обеспечение, суть которого ему не известна. Как следствие, результатом может быть выделение грунтовых тел, несоответствующих классификации ГОСТ 25100-2020 [2] и невозможность сопоставления данных СРТ с бурением и лабораторными исследованиями. Другим случаем может быть обработка по собственным алгоритмам, которые также остаются «закрытыми» для конечного пользователя и невозможностью такие результаты проверить, подтвердить или опровергнуть. Ввиду того, что процедуры обработки и интерпретации результатов СРТ не стандартизованы, необходимо их детально описывать, использовать доступные источники для демонстрации и подтверждения, т.е. информация должна быть открытой и прозрачной.

В части калибровки зондов и используемых датчиков в ходе выполнения тестов новый ГОСТ предполагает описывать этапы пошагово, с необходимостью сопоставления измеряемых параметров. Это важно для чувствительных датчиков, чтобы в ходе теста можно было проверить их работу, погрешность реальных измерений и при необходимости заменить зонд или датчик, повторить измерение, что невозможно сделать уже после выполнения полевых испытаний в ходе камеральной обработки материалов. Соблюдение требований и условий заданных погрешностей и офсетов при таких измерениях и повторяемости операций при полевых испытаниях подтверждает их достоверность и надежность.

Установление корректных и «правильных», рабочих требований к проведению, организации и обработке испытаний грунтов в естественном сложении должно способствовать их более широкому применению. Результатом этого может быть повышение эффективности таких исследований, надежности инженерно-геологических изысканий в целом. Это тем более важно для проектирования и строительства капитальных объектов морской инфраструктуры. Расширение нормативной и методической базы полевых испытаний на шельфе также необходимо сопровождать модельными и эталонными лабораторными исследованиями для получения региональных корреляций, и в дополнение к ним зависимостей между измеряемыми при тестировании параметрами и физико-механическим свойствами грунтов, которые повышают достоверность исследований.

Список литературы

1. ГОСТ 19912-2012 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием (с изменением № 1 (ИУС 6-2019)).
2. ГОСТ 25100-2020 Грунты. Классификация.
3. Локтев А.С. Статическое зондирование при выполнении инженерных изысканий на шельфе // Материалы XIII Общероссийской научно-практической конференции изыскательских организаций «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации». М.: ООО «Геомаркетинг», 2017. С. 555–561.
4. СП 11-114-2004 Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазовых сооружений.
5. СП*.1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Проект, вторая редакция.
6. ISO 19901-8:2014 Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures – Part 8: Marine soil investigations.
7. ISO 22476-1:2012 Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part I: Electrical cone and piezocone penetration tests.
8. Lunne T., Robertson P.K., Powell J.J.M. Cone penetration testing in geotechnical practice. London: Blackie Academic and Professional, 1997. 352 p.

A.S. Loktev¹, E.A. Voznesensky²

¹Lomonosov Moscow State University Marine Research Center LLC, Moscow, andreiloktev@mail.ru;

²Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Lomonosov Moscow State University, Moscow, arnoldych@gmail.com

CONE PENETRATION TEST OF OFFSHORE SOILS. REQUIREMENTS AND PRACTICE

Abstract. Cone penetration test (CPT), including various types and modes, is a standard technique of offshore water-saturated soil investigation. CPT provides properties of undisturbed soils. These

kinds of in-situ testing are spread worldwide but still are not often implemented in Russian practice. The main reasons of its deficient are resulted from domestic equipment absence and outdated regulatory framework. A new state standard (GOST) “Marine soil investigations” is currently under development. The GOST is based on ISO 19901-8:2014 “Petroleum and natural gas industries – Specific requirements for offshore structures – Part 8: Marine soil investigations”. The new national regulatory document will provide requirements for preparation, calibration, implementation of various CPT of soils.

Key words: cone penetration test; shelf; soil; pore pressure; cone; cone resistance; piezo sensor.

**Горобцов Д.Н.¹, Фоменко И.К.¹, Кургузов К.В.¹, Новгородова М.А.¹,
Сироткина О.Н.²**

¹РГГРУ имени Серго Орджоникидзе (МГРИ), гидрогеологический факультет, кафедра инженерной геологии,
г. Москва, ifolga@gmail.com, marga_97@mail.ru

²МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра динамической геологии, г. Москва

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ДАННЫХ СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ГРУНТОВ

Аннотация. На сегодняшний день полевые испытания приобретают все большее распространение. Однако в результате статического зондирования изыскатели получают косвенные данные по физико-механическим свойствам грунтов, которые можно интерпретировать на основе полученных корреляционных зависимостей. Целью работы является сравнение различных методик, как отечественных, так и зарубежных авторов для анализа результатов испытаний грунтов статическим зондированием. Выполнено сопоставление различных вариантов определения модуля деформации. Дополнительно представлен расчет осадки по данным двух разных методик определения модуля деформаций в программе RS2 программного комплекса Rocscience.

Ключевые слова: инженерная геология; грунт; полевые испытания; статистическое зондирование; модуль деформации; расчет осадки.

Введение

Полевые исследования грунтов с помощью конического зонда впервые были выполнены в 1932 г. в Голландии инженером П. Барентсеном. В дальнейшем было добавлено измерение трения грунта о боковую поверхность внедряемого прибора. В 1948–1949 гг. лабораторией механики грунтов Дельфтского университета была изготовлена электрическая версия пенетрометра с непрерывной записью величины лобового сопротивления по глубине [7].

Испытания грунтов методом статического зондирования также проводились в СССР, и тема получила отражение в рекомендациях СН 448-72 «Указания по зондированию грунтов для строительства». Далее в 1974 г. был издан первый стандарт для статического зондирования ГОСТ 20069-74 «Грунты. Метод испытания статическим зондированием», с последующим переизданием в 1981 г. и разработкой ГОСТ 19912-2012 «Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием» в 2012 г. [2]. В современной практике инженерно-геологических изысканий статическое зондирование используется в качестве обязательного метода полевых исследований в соответствии с СП 446.1325800.2019 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» [4].

Основа статического зондирования грунтов заключается во вдавливании в грунт металлического зонда-конуса или, другими словами, индентора. С развитием теории статического зондирования и по мере накопления фактического материала было установлено, что измерение лобового

сопротивления q_c , бокового трения f_s и порового давления u_2 , являются обязательным условием корректности получаемых данных, при этом дополнительные датчики служат для решения специальных задач.

Однако эти данные не являются конечным результатом, их интерпретируют в физико-механические свойства грунтов на основе полученных корреляционных зависимостей. Возникает вопрос: какие же корреляционные зависимости использовать и как оценивать их достоверность и надежность? В качестве примера приведены результаты определения недренированной прочности на основе результатов испытаний статическим зондированием по методике Муна (Moon, 2016), Мейна (Mayne, 2015) [6] (рис. 1).

Рис. 1. Результаты определения недренированной прочности на основе результатов испытаний статическим зондированием по методике [6]

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о несопоставимости полученных данных по недренируемой прочности грунтов.

Проблематика интерпретации данных статического зондирования

По данным измерений, полученным в процессе испытания, определяют значения q_c , Q_s (для механического зонда) или q_c , f_s (для электрического зонда), а также других дополнительно измеряемых параметров (для специальных зондов). По полученным данным составляют таблицы и строят графики изменения этих величин по глубине зондирования и во времени (при прерывистом зондировании).

Интерпретация параметров грунтов при помощи статического зондирования регламентируется в России в настоящее время приложением Ж СП 446.1325800.2019 [4], согласно которому возможно получить следующие параметры:

- плотность сложения песков;
- нормативный модуль деформации E для песчаных грунтов;
- нормативный угол внутреннего трения φ ;

- нормативные значения модуля деформации E , угла внутреннего трения φ и удельного сцепления C для глин, суглинков и супесей.

На данный момент существуют положительные перспективы дополнения регламента, отраженные в проекте 2020 г. СП*.1325800.2021 «Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе» [5] и работах Г.Г. Болдырева [1].

Одной из зарубежных программ, в которой возможна комплексная обработка результатов статического зондирования, является Settle 3D программного комплекса Rocscience [6]. Параметры, определяемые в Rocscience Settle 3D, не являются абсолютно истинными, но имеют некоторую степень достоверности и основаны, главным образом, на известной работе Р.К. Robertson, et al. [7]. Пример расчета таких параметров приведен в таблице.

Таблица

Неопределенность параметров, получаемых при интерпретации данных статического зондирования

Тип грунта	D_r	K_0	OCR	S_u	φ'	E	G_0
Дисперсные несвязные (песок)	2–3	5	5	–	2–3	2–3	2–3
Дисперсные связные (глина)	–	2	1	1–2	4	2–4	2–4

Формулы расчета приведенных параметров в Rocscience Settle 3D имеют следующий вид:

$$D_r = 100(0,268 \ln(q_{t1}) - b_x), \quad (1)$$

$$E = a_E(q_t - \sigma_{v0}), \quad (2)$$

$$\text{OCR} = 0,25 Q_t^{1,25}, \quad (3)$$

$$S_u = (q_t - \sigma_v)/N_{kt}, \quad (4)$$

$$\tan \varphi' = (\log(q_c/\sigma'_{v0}) + 0,29), \quad (5)$$

$$K_0 = 0,359 + 0,071 K_D - 0,00093(q_c/\sigma_{v0}), \quad (6)$$

$$G_0 = (\gamma/g) V_s^2, \quad (7)$$

где

- D_r – relative density (удельная плотность);
- E, G – Young's and shear moduli (модуль Юнга и модуль сдвига);
- OCR – overconsolidation ratio (коэффициент переуплотнения);
- S_u – undrained shear strength (недренированная прочность на сдвиг);
- φ' – peak friction angle (эффективный угол внутреннего трения);
- K_0 – *in-situ* stress ratio (коэффициент бокового давления в массиве грунта);

- G_0 – small strain shear modulus (малый модуль сдвиговых деформаций).

Не вызывает сомнения тезис о том, что свойства грунтов определяются их состоянием (в т.ч. и напряженным). Однако, именно он является определяющим при сравнении подхода к интерпретации данных статического зондирования принятым в России и за рубежом. Следует заметить, что данное отличие существовало не всегда. Игнорирование глубины погружения зонда на получаемые результаты, по крайней до 1990-х гг. наблюдалось и в зарубежных подходах. В частности, это можно заметить на примере классификационных диаграмм Р.К. Robertson, et al. [7] 1986 и 1990 гг. (рис. 2).

Рис. 2. Диаграммы Р.К. Robertson, et al. [7]: а – 1986 г. (ненормализованная); б – 1990 г. (нормализованная с учетом глубины погружения зонда)

В публикуемой работе, в качестве параметра, используемого для сравнения, был взят модуль деформации. Как отмечено в работе [3], корреляционная зависимость между параметром статического зондирования q_t и параметрами деформационных свойств (модуль общей деформации E) в отечественной практике имеет вид:

$$E = a q_t \quad (8)$$

или

$$E = a q_t + b, \quad (9)$$

где a и b – эмпирические коэффициенты, зависящие от вида грунта.

В практике зарубежных исследований связь между E и сопротивлением грунта внедрению конуса при статическом зондировании q_t ранее также имела вид:

$$E = a q_t. \quad (10)$$

Однако в последнее время [7] используется иная зависимость:

$$E = a(q_t - \sigma), \quad (11)$$

где σ – природное давление.

На рис. 3 приведено сопоставление графиков изменения модуля деформации, полученных на основе зависимостей (9) и (11).

Рис. 3. Сопоставление графиков изменения модуля деформации, полученных на основе зависимостей: а – (9), модуль деформации E в КПа; б – (11), модуль деформации E в МПа

Анализ результатов показывает различие в величинах модуля деформаций в 3–4 раза.

Обсуждение результатов

О последствиях в различии результатов определения значений модуля деформации E по результатам статического зондирования, можно судить по результатам расчета осадки, используя одни и те же данные статистического зондирования, проинтерпретированные по двум методикам: российской и зарубежной (рис. 4). Как можно заметить, разница в значениях осадки различается практически в два раза (15,5 и 8,0 см). Это говорит о том, что интерпретация данных статистического зондирования очень неоднозначная тема, к которой следует приступать с осторожностью для получения максимально приближенных к реальности данных.

Зарубежный подход

Российский подход

Распределение модуля деформации E

Осадка 8,0 см

Осадка 15,5 см

Рис. 4. Результаты расчета осадки на основе данных статического зондирования

Выводы

На сегодняшний день не существует унифицированной методики для интерпретации данных статистического зондирования. Использовать зарубежные практики – не самый подходящий вариант, их применение в российской практике требует комплексного анализа и апробации. Кроме того, нужна привязка методики к региональным особенностям, а это сложные многолетние исследования, осуществимые только с государственной поддержкой, которая в настоящее время в области инженерно-геологических изысканий практически полностью отсутствует.

Список литературы

1. Болдырев Г.Г. Руководство по интерпретации данных испытаний методами статического и динамического зондирования для геотехнического проектирования. М.: ООО «Прондо», 2017. 476 с.
2. ГОСТ 19912-2012 Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием.
3. Зиангиров Р.С., Каширский В.И. Оценка деформационных свойств дисперсных грунтов по данным статического зондирования // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2005. № 1. С. 12–16.
4. СП 446.1325800.2019 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
5. СП*.1325800.2021 Инженерные изыскания для строительства на континентальном шельфе. Проект, вторая редакция.
6. CPT data interpretation theory manual. Toronto: Rocscience Inc., 2016.
7. Robertson P.K., Cabal (Robertson) K.L. Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering, 6th edition. Signal Hill: Gregg Drilling and Testing, 2015. 137 p.

**D.N. Gorobtsov¹, I.K. Fomenko¹, K.V. Kurguzov¹, M.A. Novgorodova¹,
O.N. Sirotkina²**

¹Ordzhonikidze Russian State Geological Prospecting University (MGRI),
Moscow, ifolga@gmail.com, marga_97@mail.ru

²Lomonosov Moscow State University, Moscow

INTERPRETATION OF DATA OF SOIL CONE PENETRATION TESTING

Abstract. Today, field testing is becoming more common. However, because of cone penetration testing, prospectors obtain indirect data on the physical and mechanical properties of soils, which can be interpreted, based on the obtained correlation dependences. The aim of this work is to compare various techniques, both domestic and foreign authors, for analyzing the results of soil tests by static

sounding. Comparison of various options for determining the deformation modulus is carried out. In addition, the calculation of the settlement, carried out according to the data of two different methods for determining the deformation modulus, is presented in the RS2 program of the Rocscience software package.

Key words: engineering geology; soil, in-situ tests; cone penetration testing; deformation modulus; settlement calculation.

Мирный А.Ю.

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии,
г. Москва, MirnyyAY@mail.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ДЕФОРМАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ ТРЕХОСНОГО СЖАТИЯ В СООТВЕТСТВИИ С ГОСТ 12248.3-2020

Аннотация. С 1 июля 2021 г. вступает в действие новый нормативный технический документ (НТД), регламентирующий порядок проведения испытаний трехосного сжатия. При пересмотре в данный документ внесены разъяснения по методике интерпретации результатов испытания и определению модуля общей деформации. Этот параметр является основным параметром деформируемости, используемым при проектировании оснований сооружений, в то же время его определение в настоящее время вызывает большое количество вопросов у специалистов и экспертов. В работе рассматриваются теоретические предпосылки определения модуля общей деформации в стабилометре, проводится сопоставление между различными НТД.

Ключевые слова: модуль общей деформации; трехосное сжатие; нормативные технические документы; ГОСТ; лабораторные испытания.

В основе методов расчета осадок, используемых в действующих нормативно-технических документах (НТД), лежит теория линейного деформирования. Ее использование возможно благодаря применению определенных допущений: предполагается, что нагружение происходит однократно; деформация не разделяется на упругую и пластическую составляющие; грунтовое основание представляется в виде линейно-упругого изотропного полупространства [4]. Данный подход позволил решить множество задач, связанных с перемещениями в массивах грунта.

Основные параметры, описывающие жесткость грунтового массива в теории линейного деформирования по содержанию совпадают с теорией упругости, но называются иначе: вместо модуля Юнга E используется модуль общей деформации E_0 , вместо коэффициента Пуассона μ – коэффициент относительной поперечной деформации ν . Очевидно, что значения этих параметров будут определять конечные результаты расчета перемещений, следовательно, достоверность их определения является важнейшей задачей инженерно-геологических изысканий.

На практике наиболее достоверными методами определения модуля деформации являются так называемые «прямые» методы, то есть непосредственно позволяющие измерить нагрузку и вызванную ей деформацию. Полевые методы – штамповые и прессиометрические испытания – основаны на аналитическом решении краевой задачи о воздействии на упругое полупространство. Лабораторные методы (трехосное и компрессионное сжатие) воспроизводят однородное напряженное состояние в элементарном объеме

грунта. Принято считать, что наиболее достоверным методом являются штамповые испытания, т.к. фактически штамп является моделью фундамента на естественном основании.

Испытания трехосного сжатия в консолидированно-дренированном режиме позволяют определить модуль общей деформации в схожих условиях: в начале опыта воспроизводится исходное напряженное состояние, соответствующее действующим в массиве бытовым напряжениям, после чего проводится увеличение вертикальной нагрузки. Но, в отличие от штампового испытания, горизонтальное напряжение автоматически поддерживается постоянным, в результате чего преобладает девиаторное нагружение, а среднее напряжение увеличивается медленнее, чем под штампом. Подробное описание расхождений в траекториях нагружения при различных методах испытаний приведено в различных исследовательских работах [2, 9]. Тем не менее, на начальном участке опыта сопротивление вертикальному сжатию будет иметь очень близкую природу.

Первым НТД, регламентирующим определение модуля деформации в приборах трехосного сжатия, был ГОСТ 26518-85 «Грунты. Метод лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости при трехосном сжатии» [8]. В этом документе предлагалась графическая аппроксимация зависимости деформаций от вертикального напряжения (рис. 1, а). При этом начальная точка зависимости соответствовала нулевому значению деформаций и ненулевому значению вертикальных напряжений – т.е. за начальную точку диапазона принималось исходное стабилизированное напряженное состояние. Необходимо отметить, что такое построение вполне соответствует методике обработки данных ГОСТ, где за начальную высоту образца принимается высота образца после завершения консолидации. В таком же виде график был приведен в ГОСТ 12248-96 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости» [7].

Рис. 1. Схемы определения модуля общей деформации по результатам испытаний трехосного сжатия: а – ГОСТ 26518-85 [8]; б – ГОСТ 12248-2010 [6]

В ГОСТ 12248-2010 [6] данный график был представлен в измененном виде (рис. 1, б) – начало зависимости располагалось в точке с координатами (0,0). Данное построение в принципе противоречит предположению о том, что в ходе трехосных испытаний восстанавливается исходное напряженное состояние – ведь в состоянии покоя деформации предполагаются нулевыми, а на схеме график выходит из начала координат. В результате такого изменения аппроксимирующая прямая «повисла в воздухе», а какие-либо конкретные координаты точек указаны не были.

Такое состояние, зафиксированное в НТД, на практике привело к ситуации, когда значение модуля деформации определялось исключительно выбором диапазона, и могло быть легко «откорректировано» в ту или другую сторону. Во избежание излишних вопросов при прохождении экспертизы результат испытания приводился либо к значениям из приложения А СП 22.13330.2016 [10], либо к результатам штамповых испытаний. Фактически неоднозначность интерпретации НТД привела к снижению качества результатов лабораторных испытаний. Модуль деформации, определенный по трехосным испытаниям, стал восприниматься как недостоверный параметр.

Частичной попыткой изменить эту ситуацию было введение в ГОСТ 12248-2010 [6] модуля деформации при 50% прочности E_{50} . К сожалению, каких-либо положительных результатов это не дало. Данный модуль используется как параметр нелинейной зависимости деформаций от девиатора и какого-либо физического смысла не имеет. Диапазон деформаций, в которых определяется его величина, превышает обычный уровень деформаций в основании сооружения. Для пылевато-глинистых грунтов, в которых график заметно выполаживается в ходе опыта, модуль E_{50} принимает настолько низкие значения, что расчет осадок становится нецелесообразным. Наконец, ни в одном расчете сводов правил данный параметр не фигурирует, следовательно, его определение не востребовано в практике.

С 01.06.2021 вступает в действие ГОСТ 12248.3-2020 «Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия» [5]. В этом документе изменена (а, вернее, впервые регламентирована) процедура выбора диапазона определения модуля деформации. За первую точку диапазона принимается начало девиаторного нагружения – т.е. ноль по оси относительной вертикальной деформации. Эта точка соответствует окончанию консолидации (не важно, изотропной либо анизотропной) и, следовательно, должна воспроизводить исходное состояние грунта.

Вторую точку диапазона изначально предлагалось зафиксировать по уровню деформаций, например, на уровне 2–3%. Современные исследования в области грунтоведения показали, что изменение механического поведения грунтов связано со смещениями отдельных частиц [3, 11], следовательно, именно деформации будут определять состояние структуры и жесткость грунта в целом. В коллективе разработчиков ГОСТ 12248.3-2020 обсуждалась возможность

решения обратной задачи: сопоставления фактически наблюдаемых осадок сооружений с мощностью сжимаемой толщи и получения осредненного диапазона деформаций обратным пересчетом.

Данная гипотеза не нашла поддержки у представителей НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО НИЦ «Строительство» как ответственных исполнителей ГОСТ 12248.3-2020 [5], в результате чего было принято решение вторую точку диапазона определять по уровню бытовых напряжений. В окончательной редакции документа представлены схемы к определению модулей, показанные на рис. 2.

Рис. 2. Схемы определения по результатам испытаний трехосного сжатия по ГОСТ 12248.3-2020 [5]: а – модуля общей деформации, б – модуля при 50% прочности, в – модуля разгрузки и повторного нагружения

В качестве начальной точки определения модуля деформации принимается эффективное вертикальное бытовое давление на глубине отбора σ'_{zg} (в случае изотропной консолидации это так же величина давления в камере). Вторая точка диапазона на 60% превышает бытовое давление – $1,6 \sigma'_{zg}$ (см. рис. 2, а). Такая величина – 60% – была выбрана с той целью, чтобы обеспечить возможность получения данной точки как при кинематическом, так и при статическом нагружении, когда ступень нагрузки принимается в качестве доли от среднего эффективного давления консолидации.

Коэффициент относительной поперечной деформации определяется в этом же диапазоне, т.к. вместе с модулем общей деформации он является параметром условно-линейной зависимости в теории линейного деформирования. Определение данных параметров на различных участках опытной кривой ни в коем случае не допускается.

Необходимо отметить, что данный участок графика для абсолютного большинства грунтов соответствует фазе уплотнения, когда пористость с ростом нагрузки уменьшается, и наблюдаются объемные деформации – именно в данной фазе предполагается работа оснований в теории линейного деформирования. Попытки определять модуль деформации на участках графика, где преобладают деформации сдвига, а зависимость « $\varepsilon_v - \varepsilon_1$ » начинает возрастать (идет

дилатансия) не соответствуют работе грунта в основании. Следовательно, и сопоставление модулей деформации по результатам штамповых и трехосных испытаний может выполняться только в этом, достаточно небольшом, диапазоне.

Секущий модуль при 50% прочности определяется уже в координатах девиатора напряжений q (см. рис. 2, б). Каких-либо отличий схемы определения от предыдущей редакции ГОСТ не имеется.

В новый документ добавлена схема определения модуля разгрузки, определяемого на ветви разгрузки между точками B и A (см. рис. 2, в). Начальная точка ветви разгрузки принимается равной двум ступеням вертикального напряжения (10–60% от σ'_{zg} , в зависимости от разновидности грунта), но может быть определена заданием. Точка B располагается на пересечении ветвей разгрузки и повторного нагружения, что позволяет графически осреднить модули при разгрузке и повторном нагружении. Точка A совпадает с окончанием разгрузки и должна на 10 кПа превосходить вертикальное бытовое давление. Величина 10 кПа требуется для того, чтобы при изотропной консолидации не происходило отрыва штока от штампа в ходе разгрузки.

Рекомендуемую точку проведения разгрузки оказалось необходимо зафиксировать в связи с тем, что упругие свойства грунта меняются в зависимости от достигнутого уровня деформаций: чем ближе к предельному значению девиатора выполняется разгрузка, тем меньше получаемое значение модуля E_{ur} . Это явление связано с деградацией жесткости, что было экспериментально продемонстрировано в исследованиях [1, 11, 13]. В связи с этим рекомендуется модуль разгрузки определять ближе к началу опыта, когда структура образца еще не нарушена. Проведение разгрузки ниже точки бытового давления (т.е. в отрицательном направлении оси вертикальных напряжений) не лишено смысла, но может быть реализовано исключительно в камерах типа Б.

Принятые в новом НТД методы определения являются компромиссными: с одной стороны, проведение и интерпретация результатов трехосных испытаний должны определяться программой инженерно-геологических изысканий, с другой, какие-то нормированные методики должны быть представлены в ГОСТ. Очевидно, что у практикующих специалистов возникнут вопросы и замечания, которые можно будет учесть при актуализации данного документа.

В заключении следует отметить, что сама концепция модуля общей деформации как характеристики линейно-деформируемого основания применима только в том случае, если экспериментально подтверждается близкий к линейному характер зависимости осадки от нагрузки. Например, Н.А. Цытович указывал, что принцип линейной деформируемости справедлив только для грунтов «средней уплотненности при давлениях порядка 0,1–0,3 МПа» [12]. В случае, если в ходе проектирования возникает необходимость учета нелинейной работы грунта при больших сдвиговых деформациях СП 22.133330.2016 [10]

предписывает применение численных методов расчета. В этом случае прямыми методами определения параметров могут являться исключительно лабораторные методы, где известны все компоненты напряженно-деформированного состояния в ходе опыта. Штамповые и прессиометрические испытания могут служить лишь для верификации полученных параметров (см. п. 5.1.13 [10]), т.к. напрямую получить параметры нелинейных моделей полевыми методами невозможно в связи с отсутствием аналитических решений.

Список литературы

1. Бершов А.В., Мирный А.Ю., Усов А.Н. Определение модуля деформации разгрузки в дисперсных грунтах и его учет при проектировании // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2020. № 1. С. 2–7.
2. Болдырев Г.Г. Методы определения механических свойств грунтов. Пенза: ПГУАС, 2008. 695 с.
3. Вознесенский Е.А. Пороговые деформации в грунтах // Геотехника. 2018. № 5–6. С. 6–16.
4. Герсеванов Н.М. Основы динамики грунтовой массы. Л.: Госстройиздат, 1933. 196 с.
5. ГОСТ 12248.3-2020 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
6. ГОСТ 12248-2010 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
7. ГОСТ 12248-96 Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
8. ГОСТ 26518-85 Грунты. Метод лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости при трехосном сжатии.
9. Мирный А.Ю. Аналитическое сопоставление методов прямого определения параметров деформируемости грунта // Геотехника. 2018. № 1–2. С. 40–50.
10. СП 22.13330.2016 «СНиП 2.02.01-83 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция».
11. Усов А.Н., Вознесенский Е.А. Деформационная неустойчивость в глинистых грунтах. Возникновение и идентификация // Инженерная геология. 2016. № 2. С. 14–21.
12. Цытович Н.А. Механика грунтов (краткий курс). М.: Высшая школа, 1983. 288 с.
13. Benz T. Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences: PhD Thesis. Stuttgart, Germany: Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart, 2007. 209 p.

A.Yu. Mirnyy

Lomonosov Moscow State University, Moscow, MirnyyAY@mail

**DETERMINATION OF THE DEFORMATION MODULUS
BASED ON THE RESULTS OF TRIAXIAL COMPRESSION TESTS
IN ACCORDANCE WITH GOST 12248.3-2020**

Abstract. On the 1st of July, 2021, a new regulatory technical document regulating the triaxial testing procedure comes into force. This document explains how the test results are interpreted and how the total deformation modulus is determined. This parameter is the main parameter of deformability used in the design of the foundations of structures, at the same time, its definition currently raises a large number of questions from specialists. The publication considers the theoretical prerequisites for determining the total deformation modulus in a triaxial cell, and compares it with the current regulatory documents.

Key words: total deformation modulus; triaxial test; regulatory technical documents; GOST; laboratory tests.

Лехов М.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, лаборатория охраны геологической среды
и взаимосвязи поверхностных и подземных вод, г. Москва, mvlekhov@geol.msu.ru

ОПЫТНЫЕ ОТКАЧКИ В ИЗЫСКАНИЯХ: НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ И НЕОДНОЗНАЧНОСТЬ

Аннотация. В публикации, содержание которой частично нашло отражение в докладе на конференции, кратко затронуты проблемы постановки и пригодности опытных откачек в инженерно-геологических изысканиях. Дана характеристика причин, которые приводят к ошибочным результатам. Отмечены главные позиции, которые должны учитываться изыскателями: откачки (наливы) должны быть кустовыми и планироваться с использованием аналитических или численных моделей. При этом предпочтение следует отдавать последним как опытам большей степени адекватности природным и техническим условиям. Охарактеризованы неблагоприятная ситуация с прогнозными гидрогеологическими исследованиями и место в них опытных откачек. Отмечены типичные ошибки в обработке данных откачек.

Ключевые слова: изыскания; откачки; параметры; модель; прогноз.

Типы откачек

Опытные откачки из скважины – единственный полевой метод определения фильтрационных параметров водоносного горизонта. Наливы применяются реже, но имеют равную степень информативности и теоретической обоснованности.

Обоснованными могут считаться исключительно кустовые откачки или наливы, поскольку реакция наблюдательных скважин свободна от влияния емкости и состояния центральной скважины. Индикаторные кривые понижений в наблюдательных скважинах поддаются более уверенной диагностике по сравнению со скважиной, из которой откачивают воду, – центральной или опытной одиночной.

Режим понижения в опытной скважине всегда осложнен, что исключает выбор адекватной расчетной схемы и вследствие этого затрудняет получение однозначной величины проводимости [5]. Расчет других фильтрационных параметров по одиночной откачке возможен только теоретически.

Правила производства изысканий по СП 446.1325800.2019 «Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ» [8] дают определение одиночных откачек как вспомогательного способа, дополняющего опорные кустовые опыты. Кусты дают возможность обеспечить недостающие параметры – коэффициенты пьезопроводности, перетекания, анизотропии, – которые не могут быть получены одиночными откачками, и таким образом придать достоверность расчетам.

В инженерно-геологических изысканиях, не связанных с прогнозными исследованиями, откачки не требуются. Для прогнозных расчетов пригодны только кустовые. Одиночные откачки как единственный полевой метод определения проводимости и тем более коэффициента фильтрации применяться не могут, т.к. не может быть доказана однозначность результата. Анализ режима, особенностей графиков временного прослеживания и причин осложнения одиночных откачек содержится в специально посвященной этому вопросу статье автора [5].

Экспресс-откачки и наливов, наконец, «ушли» или почти «ушли» из практики инженерно-геологических изысканий, в нормативах гидрогеологических исследований они отсутствуют, и хотя бы в этом видится прогресс. Все же нередко можно услышать сожаления изыскателей по этому поводу. Действительно, в течение 60–70 лет активного применения изыскатели имели практически бесплатный способ оправдания опытов, которые дают грубые ошибки. Этому способствовало, помимо дешевизны и простоты проведения, наличие и удобного графического способа Хворслева, и полного решения дифференциального уравнения, реализованного в компьютерных программах. Видимо, следует еще раз напомнить, что на ход восстановления уровня воды в скважине после возмущения действуют множество параметров, связанных в уравнении в комплексный аргумент. По одной индикаторной кривой получить их значения не удастся. Экспресс-опыты проводятся в плохо подготовленных скважинах, имеющих существенное сопротивление за счет кольтматации, и поэтому дают заниженные в несколько раз коэффициенты фильтрации. Причины дефектности экспресс-опытов подробно изложены в статье автора [6].

На практике изыскатели продолжают проводить одиночные опыты, а экспертиза такие работы принимает, тем самым оправдывая нецелевую трату средств. Обе стороны нарушают установленный порядок. Для того чтобы придать проводимости или коэффициенту фильтрации, полученному по одиночным и экспресс-опытам, оттенок легитимности, оперируют понятием «ориентировочный» или «предварительный». Но ошибки одиночных и тем более экспресс-откачек носят не случайный, а систематический характер, и для нужд прогноза такие значения (учитывая, что они могут отличаться в несколько раз от истинных) не могут быть приняты ни как ориентировочные, ни как предварительные. Вопрос: зачем же проводить такие опыты, – остается без ответа. Разве что – оправдать некачественную работу или создать видимость изучения, не имея профессиональных навыков. Имеет место не менее серьезная проблема – проверить выполнение откачки заказчик и экспертиза не может (в т.ч., из-за отсутствия специальных знаний и опыта). Не под силу это может быть и специалисту-гидрогеологу.

Вместе с тем и кустовые опыты не совершенны. До 30% наблюдательных скважин оказываются инерционными, имеют иные, чем в задании, глубины

установки фильтра, недовосстановленные уровни воды. Эти технические огрехи (им могут не придавать значения, а могут и скрывать) приводят к искаженным индикаторным графикам. Не понимая причины искажения, обработчик объясняет «характерный» график влиянием природных факторов (анизотропия, пропущенный при бурении прослой и т.д.), что приводит к ошибочному, а то и нелепому результату.

Вопросы обработки

Серьезным препятствием к изучению параметров является отсутствие у изыскателей квалификации, опыта и знания теории. В образовательном процессе все меньше внимания уделяется анализу структуры проводимости, условиям залегания подземных вод, природе водоотдачи и диагностике опытных данных.

Для удобства расчетов откачек разработаны программы табуляции аналитических решений для ряда фильтрационных схем. Определение фильтрационных параметров производится подбором, путем сопоставления расчетных и опытных графиков, что представляет собой компьютерную реализацию метода эталонных кривых.

В производственном процессе инженерно-геологических изысканий владение компьютерными программами создает иллюзию компенсации таким способом дефицита знаний. Действительно, в случаях, когда неприменимы канонические приемы, программа существенно облегчает расчеты, но не снимает с пользователя обязанности обоснования схемы. Выбор формулы должен быть доказан. Должны быть проверены критерии ее применимости к расчетному участку графика. Примером может служить время наступления квазистационарного режима в методе прямой линии Джейкоба. Без ее оценки расчет проводимости восприниматься не должен.

Все чаще настораживает ситуация: заказчик, эксперт, шагающий в ногу со временем, ставит перед исполнителем требование обработать откачку, именно используя «программу». Обычно примеры такого рода – неумелые одиночные откачки, неподготовленные и плохо документированные, по конструкции не соответствующие схеме проводимости. В этом случае имеет место мотивация иного рода – прикрыть плохой опыт современной компьютерной обработкой. Неопределенность и бессмысленность результата понятна, но проверяющая сторона, скорее всего, опыт зачтет.

Нельзя не отметить, что упомянутый метод прямой линии Джейкоба является наиболее совершенным, несмотря на свою простоту. Конечно, и он требует обязательного доказательства соответствия логарифмики решения выбранному участку графика, отсутствия искажения (для ближайшей наблюдательной скважины) за счет емкости центральной скважины, отсутствия влияния упругого перетекания и т.д. Но бесспорным преимуществом является

возможность исключения из расчетной формулы дополнительного сопротивления за счет несовершенства и кольматации [4, 5].

Численная модель в планировании и интерпретации

Кустовые откачки (наливы), являясь дорогим видом работ, немыслимы без планирования, которое должно исходить из задач исследований и природных условий. В неоднородном горизонте при наложении влияния факторов, при особых условиях на скважине, при динамическом осушении слоев помощь в планировании может оказать численное моделирование. Численная модель способна симулировать планируемый опыт, задавая параметры среды и скважин «в лоб» в том количестве, которое охватывает профессиональное воображение исполнителя, в то время как аналитические решения Тейса, Хантуша, Ноймана и др. [7, 9] для условий, выходящих за границы схем, для которых они были получены, могут использоваться с натяжкой, и давать ошибочную картину режима предполагаемой откачки.

Расчет притока к скважине в сложных условиях является нетривиальной задачей, требующей корректной алгоритмизации граничных условий. Задача относится к профильно-радиальному типу, и решение удовлетворительной точности может быть получено только при осесимметричной разбивке. Программа численного моделирования 1WELL разработана автором [3] на основе метода конечных элементов с трансформацией сетки под криволинейной свободной поверхностью и на скважине. Программа предназначена для обработки и планирования откачек и наливов с известным дебитом или заданным напором, или в смешанных условиях, включая период восстановления. Программа 1WELL как симулятор откачек используется в обучении студентов и в системе повышения квалификации специалистов.

Откачки и прогноз

Небрежность подготовки опытов и неквалифицированная обработка являются следствием формального отношения к опытно-фильтрационным работам в инженерно-геологических изысканиях. Откачки производят для того, чтобы выполнить требования норматива. Серьезный прогноз гидрогеологических условий должен производиться на площади, на порядки превышающей размеры сооружения. Но за отведенными границами инженерно-геологических изысканий бурение и опытные работы запрещены, а для прогнозного решения требуются параметры не только вблизи, но и на удалении от сооружения. Кроме того, плановая неоднородность требует постановки откачек пусть не на каждый, но все же на характерные типы проводимости горизонта.

Все стороны-участники процесса: заказчик, исполнитель, экспертиза, проектировщик, – понимают, что в рамках штатных изысканий качественно выполнить несколько кустовых откачек нельзя – нет времени и не будут отпущены средства. Поэтому в состав инженерно-геологических изысканий включают решение обратной задачи моделирования, что, по сложившемуся мнению, позволит получить параметры по всей площади.

С обратной задачей положение еще более неопределенное. При отсутствии независимых данных о расходе потока подземных вод «на входе и на выходе», питании, перетекании, т.е. при отсутствии водобалансовых данных решение обратной задачи может считаться корректным, если несколько элементов неоднородности опробованы кустовыми опытами, характеристики которых соответствуют особенностям строения участка. Задачей моделирования в этом случае является корректировка и построение карты проводимости, получение параметров питания, перетекания, сопротивления ложа водоема. Следует отметить, что помимо откачек нужны также данные гидродинамических съемок, наблюдения за фоном, за уровнями водоемов. В действительности результаты инженерно-геологических изысканий, полученные на ограниченном по площади участке, дополняются фоновыми данными по уровням подземных вод и параметрами. Уровни, полученные в годы, отличные по водности, сопоставить с новыми не представляется возможным. Коэффициенты фильтрации по архивным откачкам проверить также нет возможности. Остальные параметры и характеристики в изысканиях прежних лет и вновь проведенных не определяются.

Безвыходное положение

Проектирование ответственных объектов все же нуждается в гидрогеологическом прогнозе. В итоге получается противоречивая и несправедливая по отношению к его исполнителям ситуация. Производителю полевых инженерно-геологических изысканий заказчик оплачивает сданный отчет с гидрогеологическими материалами: уровнями воды и коэффициентами фильтрации. Исполнитель прогнозных расчетов, не имеющий отношения к полевым работам, вынужден использовать скудные данные, нередко не подтверждаемые обратными расчетами. При этом ответственность перед принимающей стороной на нем лежит и за прогнозные расчеты, и за исходные данные.

Дефектность полевых и прогнозных исследований могла бы заслуживать подробного обсуждения и освещения в публикациях. Но специалисты-гидрогеологи эти проблемы и так знают, а «смежники», зная, закрывают глаза, т.к. им удобна система, в которых дорогие опытно-фильтрационные и прогнозные исследования имеют подчиненное положение, но позволяют увеличивать сметную стоимость инженерно-геологических изысканий.

Некоторые ошибки обработки

В заключение необходимо обратить внимание на некоторые ошибки в обработке данных. В отчетах по инженерно-геологическим изысканиям все чаще встречается определение коэффициента фильтрации по установившемуся уровню в одиночной несовершенной скважине с использованием уравнения Дюпюи. Иначе как подгонкой такой расчет назвать нельзя. В нем присутствуют неизвестные и неопределяемые значения радиуса питания, расчетного радиуса скважины или поправки на несовершенство по степени вскрытия [2] (при неоднородности и/или перетекании ее формульная оценка ошибочна). Значения неизвестных принимают волевым решением и вставляют в расчет. Формула применима к стационарному потоку и имеет теоретический характер. По сути, это формула Дарси в радиальных координатах [9].

Кольматация фильтра и несовершенство скважины приводят к тому, что на скважине формируется значительный перепад уровней и характеризовать напор уровнем воды в ней нельзя. Подробный анализ ошибочности расчета с графической иллюстрацией приведен в работе [5]. Вместе с тем, аналогичная формула Тима с успехом может быть применена к кустовым откачкам, т.к. исходит из корректных данных по наблюдательным скважинам (с оговорками).

Связана с первой и вторая ошибка: использование в формулах и графиках вместо понижения s функции Джейкоба $s(1-s/2h)$, где h – глубина потока. Функция применима только для безнапорного потока в период работы гравитационной емкости, т.е. осушения пласта, что происходит обычно при очень длительной откачке. Функция была предложена для учета меняющейся проводимости в области [1]. Ограничения – горизонтальный водоупор, совершенная скважина, однородное строение, соблюдение предпосылки Дюпюи. Нередко при слоистом строении горизонта невозможно задать отметку, от которой отсчитывать глубину h . При одиночном опробовании водоупор может быть не вскрыт.

К сожалению, все чаще функцию Джейкоба используют для всех откачек: безнапорных, напорных и субнапорных, что при неизменной мощности потока бессмысленно. Даже в чисто безнапорных условиях в штатных инженерно-геологических изысканиях работает упругая водоотдача (за счет компрессии) и свободная поверхность на стенке опытной скважины не понижается.

И, наконец, какой параметр проницаемости толщи определяет откачка: проводимость или коэффициент фильтрации? В отчетах по изысканиям характеристикой горных пород служит коэффициент фильтрации. Но в формулах аналитических расчетов фигурирует проводимость пласта или проводимость интервала фильтра. Коэффициент фильтрации получают делением на мощность горизонта или глубину потока.

Очевидно, что переход к коэффициенту фильтрации в условиях слоистой или зональной неоднородности является, мягко говоря, условным. Неизвестно, к

какому интервалу слоистого разреза отнести проводимость и какую мощность пласта принимать.

Непонятно и назначение осредненного коэффициента фильтрации, он может служить точечной, классификационной характеристикой рассматриваемого типа горной породы, но не расчетным параметром реального водоносного горизонта, поток в котором определяется латеральной проводимостью. Чтобы получить коэффициент фильтрации слоя, надо доказать его однородность и произвести откачку, результаты которой подтверждают, что значение характеризует именно этот слой. Необходимым условием определения параметров по слоям является кустовая откачка с ярусным расположением фильтров наблюдательных скважин. Достаточным определением становится, если полученные параметры идентифицируются решением прямой задачи моделирования потока в численной профилльно-радиальной постановке [3].

Список литературы

1. Бэр Я., Заславски Д., Ирмей С. Физико-математические основы фильтрации воды. М.: Мир, 1971. 452 с.
2. Лехов М.В. Расчет поправки на несовершенство скважины при откачке в пласте ограниченной мощности // Геозкология. 2002. № 3. С. 266–274.
3. Лехов М.В. Профилльное моделирование скважин в безнапорном водоносном горизонте. Программа 1WELL // Инженерная геология. 2015. № 3. С. 52–64.
4. Лехов М.В. Приемы обработки данных кустовых откачек из несовершенных скважин // Инженерная геология. 2018. № 4–5. С. 98–107. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2018-13-4-5-98-107>.
5. Лехов М.В. Определение фильтрационных параметров одиночными откачками // Инженерная геология. 2020. № 2. С. 36–48. <https://doi.org/10.25296/1993-5056-2020-15-2-36-48>.
6. Лехов С.М., Лехов М.В. Методы расчета и причины ошибочных результатов экспресс-откачек из скважин // Инженерная геология. 2017. № 2. С. 38–50.
7. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1978. 325 с.
8. СП 446.1325800.2019 Инженерно-геологические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
9. Kruseman G.P., de Ridder N.A., 1994. Analysis and evaluation of pumping test data, 2nd edition. Publication 47. Wageningen: International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1994. 377 p.

M.V. Lekhov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, mvlekhov@geol.msu.ru

WELL PUMPING TESTS FOR ENGINEERING SURVEY: UNCERTAINTY AND AMBIGUITY

Abstract. The publication, which content was partially reflected in the conference report, the problems of setting and the suitability of pumping tests in engineering surveys are briefly discussed. The reasons which lead to erroneous results are characterized. The main principles that should be taken into account by the prospectors are noted: pumping (or injection) tests should be multiwell and should be planned using analytical or numerical models, giving preference to the latter as experiments with a greater degree of adequacy to natural and technical conditions. An unfavorable situation with predictive hydrogeological studies and the place of experimental pumping is characterized. Typical errors in pumping data processing are noted.

Key words: survey; pumping; parameters; model; forecast.

Исаев О.Н.

НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ “Строительство”», г. Москва, geotechnika2017@mail.ru

СТАТИЧЕСКОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ГРУНТА ЗОНДОМ С ДАТЧИКАМИ БОКОВОГО И ПОРОВОГО ДАВЛЕНИЙ

Аннотация. Специалисты института НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ “Строительство”» и ООО «УСМ-Инжиниринг» разработали зонд для статического зондирования, дополнительно оснащенный датчиками бокового и порового давлений. Наконечник состоит из основного и дополнительного модуля бокового давления. Основной модуль имеет пять датчиков: лобового q_c и бокового f_s сопротивлений грунта зондированию, порового давления u_2 , инклинометр и термодатчик. Дополнительный модуль оснащен шестью датчиками: три пары датчиков бокового σ_{LS} и порового u_{LS} давлений на участках с разными диаметрами. Разработаны блок измерения глубины и скорости зондирования, программное обеспечение. Оборудование имеет высокую информативность – позволяет измерять 13 параметров. Изложены результаты длительных (от 14 до 68 ч) диссипационных испытаний. Представлена методика определения природного порового давления по диссипационным кривым.

Ключевые слова: статическое зондирование; боковое и поровое давление.

Одно из направлений повышения эффективности инженерно-геологических изысканий – разработка новых multifunctional полевых экспресс-методов испытаний грунтов. В первую очередь это относится к методам зондирования [4]. За рубежом для статического зондирования широко используются зонды, оснащенные дополнительными датчиками и устройствами, позволяющие в экспресс-режиме без дополнительных затрат комплексно оценивать большой спектр геотехнических характеристик грунтов в условиях их природного залегания.

Перспективным видом специальных зондов является зонд с дополнительными датчиками бокового давления, часто в паре с датчиками порового давления. За рубежом такие зонды разрабатываются и исследуются, начиная с 1980-х гг. В литературе их часто обозначают как LS-CPT (cone penetration test with lateral stress) зонды [5].

До настоящего времени в нашей стране зонды с датчиками бокового давления для статического зондирования не разрабатывались и не использовались. Специалистами НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ “Строительство”» (далее – НИИОСП им. Н.М. Герсевича) и ООО «УСМ-Инжиниринг» разработана, изготовлена и испытана аппаратура для статического зондирования грунтов указанного типа. Зонд состоит из двух модулей, стыкуемых между собой: основного и бокового давления. Разработанное оборудование имеет высокую информативность – в процессе зондирования позволяет измерять 13 параметров [2].

Основной модуль имеет стандартные по ГОСТ 19912-2012 «Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием» [1] размеры. Кроме тензодатчиков он включает: датчик порового давления между конусом и муфтой трения, инклинометр, датчик температуры для термокомпенсации тензосистемы. Характеристики разработанной аппаратуры представлены в таблице.

Таблица

Технические характеристики разработанной аппаратуры

Наименование характеристики	Значение
Число модулей в наконечнике, шт.	2
Угол при вершине конуса, град.	60
Диаметр конуса и муфты трения, мм	35,7
Длина муфты трения, мм	310
Длина модуля бокового давления, мм	395 / 595*
Диаметр модуля бокового давления, мм	39–65 / 39–48*
Периодичность измерения параметров зондирования, Гц	1
Измеряемые параметры:	
удельное сопротивление грунта под конусом q_c , МПа	1–100
удельное сопротивление грунта вдоль муфты трения f_s , кПа	10–1000
поровое давление между конусом и муфтой трения u_2 , кПа	1–100
угол наклона наконечника зонда к вертикали α , град.	1–30
температура тензосистемы наконечника зонда T_c , °C	–20 ÷ +40
три боковых давления грунта σ_{LS1} , σ_{LS2} , σ_{LS3} , кПа	0–3000
три поровых давления на боковой поверхности u_{LS1} , u_{LS2} , u_{LS3} , кПа	–100–1000
глубина зондирования h , м	Без ограничения
скорость зондирования v , м/мин	Без ограничения

Примечание: * – в числителе для модуля с v-образной формой, в знаменателе – для модуля с трехступенчатой цилиндрической формой.

На первом этапе разрабатывалась и испытывалась тензосистема и конструкция стандартного модуля. Были разработаны и изготовлены два опытных наконечника с двумя типами тензометрической системы – раздельного и разностного типов (рис. 1). В первом случае сопротивления грунта под конусом и на муфте трения измерялись раздельно, с использованием тензодатчиков сжатия. Во втором случае – отдельно суммарное сопротивление и сопротивление под конусом, сопротивление на муфте трения определялось автоматически путем вычитания сопротивления под конусом из общего сопротивления (см. рис. 1).

Сравнительные испытания выполнялись на территории АО «НИЦ «Строительство»» на глубину до 9 м со стабилизацией зонда. Результаты зондирования регистрировались с частотой 1 Гц на персональном компьютере с использованием специально разработанной программы, позволяющей выводить на дисплее значения и графики: q_c , f_s , u_2 , α , T_c .

Рис. 1. Наконечник с тензосистемой разностного типа в разобранном виде [2]

Испытания показали, что зонд с тензосистемой разностного типа обеспечивает более стабильные и точные показания. В дальнейшем дорабатывалась и совершенствовалась конструкция зонда разностного типа.

На втором этапе разрабатывался модуль бокового давления. Он имел нестандартную форму (первоначально v-образного, в дальнейшем – трехступенчатого цилиндрического типов) и размеры (рис. 2), включал три пары датчиков бокового и порового давлений, установленных попарно на участках модуля с разными диаметрами.

а

б

Рис. 2. Общий вид (а) и участок модуля бокового давления цилиндрического типа (б) [2]

Были разработаны блок измерения глубины и скорости зондирования (устанавливался на поверхности земли и в зондирующей установке), программное обеспечение (рис. 3).

Рис. 3. Схема установленной внутри кунга зондирующей установки блока измерения глубины и скорости зондирования [2]

На площадке АО «НИЦ “Строительство”» выполнялись сравнительные испытания разработанным 3LSU-CPTU и стандартными зондами фирм АО «Геотест» (зонд «Геотест») и ООО НТЦ «ПИКА-ТЕХНОСЕРВИС» (зонд «ПИКА»). Испытания показали хорошее совпадение показаний, регистрируемых новым и стандартными зондами (рис. 4, 5).

Рис. 4. Сравнительное испытание зондом «Геотест» и зондом 3LSU-CPTU с цилиндрическим модулем бокового давления. Синяя линия – зонд 3LSU-CPTU, зеленая – зонд Геотест [2]

Рис. 5. Сравнительное испытание зондом «ПИКА» и зондом 3LSU-CPTU с цилиндрическим модулем бокового давления. Синяя линия – зонд 3LSU-CPTU, красная – зонд «ПИКА» [2]

При зондировании на площадке строительства транспортно-пересадочный узла (ТПУ) станции метро «Косино» испытание удалось выполнить на глубину 38 м и было ограничено лишь отсутствием дополнительных секций штанг на момент испытаний (рис. 6, 7).

Рис. 6. Статическое зондирование зондом 3LSU-CPTU с цилиндрическим модулем бокового давления на площадке ТПУ станции метро «Косино» [2]. Результаты испытания (средний участок модуля): а – общее давление грунта σ_{LS2} , б – поровое давление u_{LS2} , в – расчетное эффективное давление грунта $\sigma'_{LS2} = \sigma_{LS2} - u_{LS2}$

Рис. 7. Пример изменения порового давления во времени в процессе длительного диссипационного испытания полутвердой глины: а – график в координатах « $t - u_{LS}$ », б – график в полулогарифмическом масштабе « $\lg t - u_{LS}$ » [3]

Осмотр зонда после испытаний и контрольная проверка измерительных систем в лабораторных условиях не выявили отклонения и повреждения. Работа измерительных систем и программного обеспечения подтвердила их работоспособность.

С использованием разработанного зонда проводилась серия длительных (от 14 до 68 ч) диссипационных испытаний [3], позволяющих с помощью датчиков измерять во времени рассеивание порового давления в прилегающем к зонду грунте (см. рис. 7).

Было установлено, что начальное поровое давление (сразу после остановки зонда) отличается большим варьированием, может быть как положительным, так и отрицательным. С увеличением дисперсности грунта оно возрастает. Для участков, более отдаленных от конуса и имеющих больший диаметр, начальное поровое давление больше. Влияние вида грунта на начальное поровое давление, измеряемое между конусом и муфтой трения u_2 и модулем бокового давления u_{LS} не совпадает: для песка оно аналогично, для глинистых грунтов существенно отличается.

Выделено шесть типов диссипационных кривых и характерные на них участки. На характер диссипационной кривой (в т.ч. проявление дилатантных явлений) существенное влияние оказывает вид грунта и история формирования его напряженно-деформированного состояния (НС или ОС грунт). Диаметр и удаленность от конуса участка зонда влияют слабее.

За рубежом диссипационные испытания используют для оценки характеристик фильтрации и консолидации грунта. Они могут также применяться для определения природного порового давления. В стандартах ISO 22476-1 [7] и ASTM D 5778-07 [6] есть указание на возможность определения природного порового давления по диссипационным испытаниям, однако на сегодня отсутствует не только соответствующая методика, но даже публикации с исследованиями и подходами.

Для определения природного порового давления по диссипационным кривым в НИИОСП им. Н.М. Герсеева был разработан подход, основанный на аппроксимации участка диссипационной кривой аналитической зависимостью, имеющей горизонтальную асимптоту. Анализировались три типа зависимостей. С целью определения их пригодности в программе IBM SPSS Statistics была выполнена серия статистических расчетов, на основании которых определены расчетные значения природного порового давления. Вычисленные в результате аппроксимации кривых расчетные значения природного порового давления сравнивались с гидростатическим давлением (которое принималось в качестве эталона), вычисленным по замеренным уровням подземных вод в скважинах.

Список литературы

1. ГОСТ 19912-2012 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием (с изменением № 1 (ИУС 6-2019)).
2. Зонд для статического зондирования грунтов с модулем бокового давления (3LSU–CPTU) / О.Н. Исаев, Р.Ф. Шарафутдинов, Д.С. Закатов, А.Ю. Бауков, С.В. Павлов // Геотехника. 2020. Том XII. № 1. С. 60–72. <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2020-12-1-60-72>.
3. Исаев О.Н., Шарафутдинов Р.Ф., Закатов Д.С. Длительные диссипационные испытания грунта 3LSU–CPTU зондом // Вестник НИЦ «Строительство». 2020. № 3(26). С. 50–62.
4. Рыжков И.Б., Исаев О.Н. Статическое зондирование грунтов. М.: АСВ, 2010. 496 с.
5. Рыжков И.Б., Исаев О.Н. Статическое зондирование грунтов – текущие тенденции развития // Геотехника. 2019. Том XI. № 4. С. 56–67. <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2019-11-4-56-67>.
6. ASTM D 5778-07 Standard test method for electronic friction cone and piezocone penetration testing of soils.
7. ISO 22476-1:2012 Geotechnical investigation and testing – Field testing – Part 1: Electrical cone and piezocone penetration test.

O.N. Isaev

Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), Research Center of Construction JSC,
Moscow, geotechnika2017@mail.ru

CONE PENETRATION TEST OF SOILS USING LATERAL AND PORE PRESSURE SENSORS

Abstract. Specialists of the Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), Research Center of Construction JSC and USM-Engineering LLC developed cone penetration test probe additionally equipped with lateral and pore pressure sensors. Probe consists of main and additional modules of lateral pressure. The main module has five sensors: frontal q_c and lateral f_s soil resistance to probing, pore pressure u_2 , inclinometer and temperature sensor. The additional pressure module is equipped with six sensors – three pairs of sensors of lateral σ_{LS} and pore u_{LS} pressure in sections with different diameters. Also developed a unit for measuring depth and velocity of penetration, as well as software. The equipment has a high information value – it allows measuring 13 parameters. The results of analysis of long (14–68 hour) dissipation tests are presented. Method of determination of natural pore pressure by dissipation curves is presented.

Key words: cone penetration test; lateral and pore pressure.

Козлов А.В.

ООО «Автодор-Инжиниринг», г. Москва, A.Kozlov@avtodor-eng.ru

ОПЫТ ООО «АВТОДОР-ИНЖИНИРИНГ» ПО КОНТРОЛЮ КАЧЕСТВА ПРОВЕДЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ НА ОБЪЕКТАХ ГОСУДАРСТВЕННОЙ КОМПАНИИ «АВТОДОР»

Аннотация. При строительстве современных скоростных автомобильных дорог особую роль играют правильность и обоснованность принятых в проектной документации технических решений. Эти решения должны определяться в зависимости от природно-климатических и техногенных условий района прохождения автомобильной дороги. Инженерные изыскания подразумевают комплексное изучение природных и техногенных условий заданного региона, сбор, анализ и обобщение информации, необходимой для принятия обоснованных проектных решений. В публикации рассмотрены вопросы контроля качества проведения инженерных изысканий в ходе реализации проекта строительства автомобильной дороги М-12 «Москва – Казань». Подчеркивается необходимость интеграции контроля изыскательских работ в систему контрольной строительной деятельности.

Ключевые слова: автомобильные дороги; дорожное строительство; изыскания автомобильных дорог; инженерно-геодезические изыскания; инженерно-геологические изыскания; инженерно-гидрометеорологические изыскания; инженерно-экологические изыскания; инженерные изыскания; контроль изысканий.

В СМИ неоднократно поднимается проблема недостаточно высокого уровня подготовки проектной документации, преимущественно связанного с качеством выполнения инженерных изысканий [2, 3, 5, 6, 8, 9, 10]. В современных условиях строительства автомобильных и, особенно, высокоскоростных дорог, находящихся в доверительном управлении Государственной компании «Российские автомобильные дороги» (далее – Госкомпания «Автодор»), качество и полнота проведения инженерных изысканий имеют приоритетное значение. При строительстве объектов Госкомпания «Автодор» неоднократно вскрывались проектные недоработки, связанные с недостатками выполненных инженерных изысканий, прежде всего, инженерно-геологических. Несоответствие данных инженерно-геологических изысканий фактической обстановке на объекте часто приводило к необходимости разработки дополнительных проектных решений, что требовало значительных финансовых и временных затрат.

В этом ключе на первые позиции выходит необходимость контроля качества и подтверждения объемов выполненных инженерных изысканий. На дорогах Госкомпания «Автодор» история такого контроля начинается с 2016 г., с объекта «Строительство транспортной развязки на км 25 автомобильной дороги М-1 «Беларусь» Москва – граница с Республикой Беларусь, Московская область» [2].

В настоящее время, во исполнение Указа Президента РФ В.В. Путина № 204 от 07.05.2018 в целях строительства и модернизации российских участков автомобильных дорог, относящихся к международному транспортному маршруту «Европа – Западный Китай», Госкомпанией «Автодор» активно реализуется проект строительства автомобильной дороги М-12. Ее общая протяженность на участке между городами Москва и Казань составит 794 км в пяти субъектах РФ (Московская, Владимирская, Нижегородская области, Чувашская Республика и Республика Татарстан). На всем протяжении предполагается запроектировать дорогу категорий 1А – 1Б с четырехполосным движением. Завершение строительства и открытие движения запланировано на 2024 г.

Сжатые сроки строительства и повышенные требования к современным скоростным дорогам диктуют необходимость осуществления комплексного управления качеством на всех этапах жизненного цикла, начиная со стадии проведения инженерных изысканий. На современном этапе контроль качества инженерных изысканий прочно вошел в практику как один из видов контрольно-строительной деятельности [5, 7]. Контроль инженерных изысканий в ООО «Автодор-Инжиниринг» рассматривается как система мероприятий в составе контрольно-строительной деятельности, с помощью которой определяется достоверность и качество их выполнения. Главная цель контроля изыскательских работ – минимизация рисков получения некорректной информации по результатам инженерных изысканий. Опыт ООО «Автодор-Инжиниринг» по осуществлению контроля полноты и качества инженерных изысканий на этапе подготовки проектной документации уникален и в настоящее время полноценно используется при контроле строительства автодороги М-12 «Москва – Казань». Контролю подлежит весь комплекс изысканий: инженерно-геологические, инженерно-геодезические, инженерно-гидрометеорологические, инженерно-экологические.

ООО «Автодор-Инжиниринг» формализует системный подход к контролю инженерных изысканий путем формирования пакета инструктивных документов. Первым документом, утвержденным генеральным директором Общества и введенным в действие, стала инструкция АИ-06, регламентирующая процедуру фото- и видеофиксации при контроле инженерно-геологических изысканий [1]. Параллельно разрабатываются документы, описывающие последовательность подготовки программ инженерных изысканий, порядок инженерно-геологических работ и контроль качества инженерно-геологических изысканий.

Основные направления контроля качества инженерных изысканий для строительства автомобильных дорог, реализуемые ООО «Автодор-Инжиниринг»:

- оценка программы производства работ по инженерным изысканиям на соответствие требованиям нормативной технической документации (НТД), достоверности и обоснованности планируемых мероприятий;
- проверка полноты и качества полевых работ инженерных изысканий, проводимых Подрядчиком, с выездом контролирующих специалистов на Объект проведения изысканий, в т.ч. фото- и видеофиксация работ (рис. 1), включая контроль за соблюдением методики и глубины бурения, отбора проб и образцов, проведение замеров, а также оценку качества лабораторных испытаний;
- оценка полноты, достоверности и качества фото- и видеоматериалов, представляемых Подрядчиком на соответствие внутренней инструкции ООО «Автодор-Инжиниринг» АИ-06 [1];
- проведение оценки наличия необходимых согласований, полноты и достаточности исходных данных;
- контроль результатов инженерных изысканий на предмет их соответствия НТД, определяющим требования к их оформлению и комплектности.

Рис. 1. Процесс проведения буровых работ для проектирования автомобильной дороги М-12
«Москва – Казань», I этап, Московская область, 2020 г.
Из фототеки ООО «Автодор-Инжиниринг»

Объемы изыскательских работ по объекту М-12 «Москва – Казань» значительны. Только в инженерно-геологической части предусмотрено бурение 22 547 скважин. По состоянию на 20.05.2021 в ООО «Автодор-Инжиниринг» представлено на рассмотрение 260 492 файла с фото- и видеоматериалами по 20 238 скважинам; проанализировано 95% полученных данных по 19 283 скважинам. При разборе материалов фото- и видеофиксации по 5 233 скважинам (27% от количества просмотренных скважин) возникли вопросы; подрядным организациям переданы замечания. Сравнительная информация по объемам контроля качества ведения изыскательских работ по состоянию на 20.05.2021 представлена в таблице. Сотрудниками ООО «Автодор-Инжиниринг» рассмотрено и проанализировано томов отчетной документации: по инженерно-геологическим изысканиям – 1115, по инженерно-геодезическим изысканиям – 863, по инженерно-экологическим изысканиям – 367, по инженерно-гидрометеорологическим изысканиям – 185. По результатам изучения отчетной документации по видам изысканий выявлено замечаний: по инженерно-геологическим – 802, по инженерно-геодезическим – 746, по инженерно-экологическим – 1202, по инженерно-гидрометеорологическим – 458. Отмечается значительное количество повторных замечаний, которые длительное время не устраняются подрядными организациями или устраняются не в полной мере.

Таблица

Информация по объемам контроля качества проведения изыскательских работ
(по состоянию на 20.05.2021)

Вид изысканий*	ИГИ	ИГДИ	ИЭИ	ИГМИ
Проверено программ, шт.	15	10	10	10
Рассмотрено томов отчетной документации, шт.	1115	863	367	185
Общая продолжительность инспекционных выездов, дней	639	> 450	59	16
Выдано замечаний, шт.	802	746	1202	458

Примечание: ИГИ – инженерно-геологические изыскания, ИГДИ – инженерно-геодезические изыскания, ИЭИ – инженерно-экологические изыскания, ИГМИ – инженерно-гидрометеорологические изыскания.

Основные нарушения, выявленные в процессе контроля изыскательских работ, можно сгруппировать по следующим позициям:

– отсутствие полноты комплекта технической и разрешительной документации, необходимой для проведения инженерных изысканий (технического задания, программы производства работ по инженерным изысканиям, разрешений на производство работ, допусков к работам, квалификационных удостоверений);

- несоблюдение технологии проведения инженерных изысканий;
- несоответствие оформления исполнительной (полевой) документации требованиям НТД;
- неисполнение требований ГОСТ 12071-2014 «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов» [4] при отборе, маркировке, складировании, транспортировке, хранении отобранных проб грунта;
- отступления от методик проведения лабораторных исследований.

В качестве примера следует привести наиболее характерные замечания по представленным подрядными организациями материалам фото- и видеофиксации:

- отсутствует информация о дате, времени производства фото- и/или видеоматериалов;
- нет сведений о наименовании объекта и о подрядной организации, выполняющей изыскательские работы;
- отсутствует координатная привязка места съемки;
- представленные материалы не позволяют идентифицировать номер скважины;
- по фото- и/или видеоматериалам, фиксирующим процесс буровых работ, не представляется возможным установить государственный регистрационный знак транспортного средства / прицепа, на котором базируется комплекс буровых механизмов и оборудования;
- ракурс фото- и/или видеофайлов не позволяет определить длину бурового инструмента по масштабируемым окружающим объектам;
- выкладка керна в кернах в ящиках в полном объеме не подтверждается и т.д.

На достоверность инженерно-геологических изысканий существенное влияние оказывают процессы извлечения, упаковки, консервации и транспортирования образцов. Предельное внимание необходимо уделять порядку извлечения керна и стараться минимизировать вероятность нарушения структуры образцов при их отборе, упаковке и транспортировке. Особое значение имеют также период и условия хранения образцов. Соблюдение упомянутых положений является приоритетным для возможности подтверждения соответствия результатов лабораторных испытаний натурным условиям. Для минимизации получения некорректных данных ООО «Автодор-Инжиниринг» осуществляло контроль испытательных лабораторий, их оснащенности, условий хранения образцов и условий проведения испытаний.

В целях усовершенствования контроля качества инженерно-геологических изысканий ООО «Автодор-Инжиниринг» активно внедряет в работу современное оборудование. Здесь стоит отметить малогабаритные буровые установки УГБ-996 «Пионер» (рис. 2). Они закуплены и используются для выполнения работ по контрольному бурению на строительстве автодороги М-12

«Москва – Казань» в целях уточнения инженерно-геологических условий при подготовке рабочей документации.

а

б

Рис. 2. Малогабаритная буровая установка УГБ-996 «Пионер»: а – транспортное положение буровой установки на грузовом автомобиле КАМАЗ, оборудованном мультилифтом; б – пульт управления буровой установки. Фото 2021 г. Из фототеки ООО «Автодор-Инжиниринг»

В части контроля инженерно-геодезических изысканий необходимо упомянуть, что представители ООО «Автодор-Инжиниринг» осуществляют регулярные выезды на объекты строительства М-12. Контроль ведется непрерывно. По состоянию на 20.05.2021 общая продолжительность выездов по всем этапам превышает 450 дней. Проверке подлежат используемые в работе приборы и оборудование, условия проведения геодезических работ, сопровождаются работы по созданию плановой съемочной геодезической сети, закладке пунктов опорной геодезической сети (рис. 3), выполняется контроль мобильного лазерного сканирования, оценивается качество топографических работ: соответствие планово-высотного положения и полнота нанесения элементов ситуации на топографических планах и др. Создана и активно внедряется система контроля инженерно-геодезических работ с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [8]. Группировка БПЛА развернута на всем протяжении строящейся дороги М-12 «Москва – Казань». Использование БПЛА позволяет быстро и эффективно выполнять фотограмметрические работы и аэрофотосъемку местности, создавать цифровые модели объектов, проводить аэровидеомониторинг строящихся участков дорог Госкомпании «Автодор», в т.ч. приоритетного проекта М-12 «Москва – Казань», осуществлять воздушное лазерное сканирование и тепловизионную съемку местности. Это положительным образом влияет на оперативность принятия решений.

Рис. 3. Инженерно-геодезические изыскания М-12, I этап, Владимирская область, 2020 г.
Корректное оформление пунктов. Из фототеки ООО «Автодор-Инжиниринг»

Применение современных беспилотных воздушных судов оказалось незаменимым при контроле объемов вырубki леса [8]. Обработка данных воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки на основе специализированных алгоритмов и программных комплексов позволяют выполнить координирование каждого дерева в пространстве, определить его габариты и классифицировать для дальнейшего распределения объемов древесины под вырубку (рис. 4).

а

б

Рис. 4. Применение беспилотных летательных аппаратов для определения объемов вырубki леса. Из фототеки ООО «Автодор-Инжиниринг»

Проведена масштабная работа и в части контроля инженерно-гидрометеорологических изысканий (рис. 5). Подлежат контролю: работы по определению площадей водосбора, гидрологических работы по существующим водотокам, работы по обследованию гидротехнических сооружений и т.д. Выполнение всех видов работ должно сопровождаться обязательной топографической привязкой и фиксацией на фото- и/или видеоаппаратуру.

а

б

Рис. 5. Инженерно-гидрометеорологические изыскания на проектируемой трассе М-12 «Москва – Казань»: а – III этап, Владимирская область; б – VIII этап, Республика Татарстан, 2020 г. Из фототеки ООО «Автодор-Инжиниринг»

В ходе контроля инженерно-экологических изысканий осуществлялась проверка используемых подрядными организациями приборов и оборудования, а также наличие аккредитации. Решались задачи, связанные с контролем проведения работ:

- по натурным обследованиям флоры и фауны (рис. 6, а);
- по отбору проб грунта и подземных вод из скважин, а также поверхностных вод, грунта методом конверта и прикопок;
- по выполнению почвенных исследований (рис. 6, б, в);
- по замерам шумового загрязнения (рис. 6, г) и вибрации;
- по замерам электромагнитного и радиационного излучений (рис. 6, д);
- по забору проб атмосферного воздуха и пр.

Результаты рассмотрения отчетных материалов по итогам проведения инженерно-гидрометеорологических и инженерно-экологических изысканий, предоставленных подрядными организациями, позволили подготовить существенный перечень замечаний (см. табл.).

а

б

в

г

д

Рис. 6. Контроль качества инженерно-экологических изысканий. Владимирская область, М-12 «Москва – Казань», I этап: а – контроль выполнения геоботанических описаний; б – контроль выполнения почвенных исследований; в – контроль ведения полевой документации (полевое описание почвенного разреза); г – контроль измерения вредных физических факторов (шум) вблизи жилой застройки; д – контроль выполнения поисковой гамма-съемки в полосе отвода, 2020 г. Из фототеки ООО «Автодор-Инжиниринг»

Контроль изысканий при строительстве транспортных объектов в подобных объемах осуществляется впервые в отрасли и имеет существенный положительный эффект в части повышения качества изыскательских работ. Этот факт отмечен руководством Госкомпании «Автодор». Полуторогодовая работа ООО «Автодор-Инжиниринг» по контролю качества изысканий автомобильной дороги М-12 «Москва – Казань» позволила снизить количество отчетных материалов, несоответствующих требованиям НТД и Программ инженерных изысканий. Если в начальный период объем бракуемых документов достигал 70%, в настоящее время количество замечаний к отчетной документации не превышает 3–5%.

Современное положение дел в отрасли дорожно-транспортного строительства доказывает не только целесообразность, но и необходимость признания контроля качества инженерных изысканий как одного из видов контрольно-строительной деятельности. Интеграция контроля изыскательских работ в систему контрольно-строительной деятельности позволяет существенно снизить риск получения некорректных проектных решений, что в итоге положительно отразится на качестве строительства автомобильной дороги М-12 и в перспективе будет способствовать повышению безопасности движения в транспортном коридоре Москва – Казань.

Список литературы

9. АИ-06 Требования к проведению фото- и видеофиксации при контроле инженерно-геологических изысканий. М.: ООО «Автодор-Инжиниринг», 2021.
10. Бурдин А.Е., Яловец А.С. Задачи осуществления контроля качества инженерных изысканий // Дорожники. 2018. № 2(14). С. 16–21.
11. Вавринюк Т.С., Федоренко Е.В. Результаты инженерных изысканий как основа для проектирования транспортных сооружений // Инженерные изыскания. 2014. № 3. С. 46–49.
12. ГОСТ 12071-2014 Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов. М.: Стандартиформ, 2019.
13. Ермолов А.А. К вопросу о контроле качества и достоверности инженерно-геологических изысканий для проектирования // Материалы докладов Общероссийской научно-практической конференции «Современные полевые и лабораторные методы исследования грунтов – изыскания и проектирование». М.: ООО «Геомаркетинг», 2018. С. 186–191.
14. Кузахметова Э.К., Козлов А.В. Особенности прогноза развития осадки во времени при проектировании транспортных объектов в сложных условиях // Материалы докладов Общероссийской научно-практической конференции «Современные полевые и лабораторные методы исследования грунтов – изыскания и проектирование». М.: ООО «Геомаркетинг», 2018. С. 59–78.

15. Ланцова И.В. Контроль качества инженерных изысканий: за и против // Инженерные изыскания. 2012. № 4. С. 30–33.
16. Могильный К.В. Автодор-Инжиниринг на современном этапе развития // Автомобильные дороги. 2021. № 2. С. 45–48.
17. Орлов М.С. Об ошибках инженерных изысканий // Инженерные изыскания. 2016. № 10–11. С. 12–15.
18. Ракитина Н.Н., Потапов А.Д. Достоверность и достаточность инженерных изысканий для строительства: правило двух Д // Вестник МГСУ. 2014. № 1. С. 90–97.

A.V. Kozlov

Avtodor-Inzhiniring LLC, Moscow, A.Kozlov@avtodor-eng.ru

EXPERIENCE OF AVTODOR-INZHINIRING LLC IN QUALITY CONTROL OF ENGINEERING SURVEYS AT THE FACILITIES OF THE STATE COMPANY “RUSSIAN HIGHWAYS”

Abstract. In the construction of modern high-speed highways, a special role is played by the correctness and validity of the technical solutions adopted in the design documentation. These solutions should be determined depending on the natural, climatic, and technogenic conditions of the area where the highway passes. Engineering surveys involve a comprehensive study of the natural and technogenic conditions of a given region, the collection, analysis, and synthesis of information necessary for making design decisions. The publication deals with the issues of quality control of engineering surveys during the implementation of the project for the construction of the M-12 “Moscow – Kazan” highway. The necessity of integrating engineering survey control into the construction control system is emphasized.

Key words: automobile roads; road construction; road surveying; engineering-geodesic surveys; engineering-geological surveys; engineering-hydrometeorological surveys; engineering-ecological survey; engineering surveys; survey control.

Зюзин Р.С., Гуров А.С., Вавилова В.К.

АО «Институт Гидропроект» – филиал ЦСГНЭО, г. Москва, roman_277703@inbox.ru

К ВОПРОСУ О РОЛИ КРУПНОМАСШТАБНЫХ СДВИГОВЫХ ОПЫТОВ В НАЗНАЧЕНИИ РАСЧЕТНЫХ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Аннотация. В публикации излагаются основные результаты геомеханических исследований сдвиговых свойств скальных оснований четырех высоких плотин, проектируемых и построенных в России (Республика Саха (Якутия)), Узбекистане, Лаосе и Анголе. Анализируются результаты сдвиговых испытаний на бетонных штампах и целиках. Выполненный объем исследований позволил оценить прочностные характеристики оснований плотин в разных зонах сохранности массива. В публикации приводится сравнение прочностных характеристик скального массива, полученных крупномасштабными опытами в полевых условиях и путем выполнения лабораторных испытаний. Результаты выполненных исследований легли в основу назначения расчетных геомеханических характеристик скального основания на участках створов плотин.

Ключевые слова: скальное основание; крупномасштабный полевой опыт; сдвиговой опыт; прочностные характеристики.

Введение

Для инженерно-геологического обоснования проектов сооружений, возводимых на скальных основаниях, необходимо иметь данные о физико-механических свойствах пород, в частности прочности на сдвиг.

Наиболее надежным приемом определения сдвиговых свойств прочных пород оснований сооружений с учетом их трещиноватости является метод статических нагрузок на штампы в полевых условиях.

Однако в последнее время такие исследования практически не производятся из-за того, что они требуют трудоемкой и зачастую длительной подготовки, что в целом замедляет и удорожает опытные работы.

Поэтому на примерах нескольких проектируемых, строящихся и построенных гидротехнических объектов показано, как результаты крупномасштабных полевых сдвиговых опытов существенным образом повлияли на назначение расчетных прочностных характеристик оснований.

Крупномасштабные опыты в Республике Саха (Якутия)

Геомеханические опыты были выполнены на участке створа плотины Канкунской ГЭС, проектируемой в Республика Саха (Якутия), в каньоне р. Тимптон. Предполагаемая высота плотины – 230 м. Скальный массив на участке плотины сложен архейскими метаморфическими породами – гнейсами, гранитами и гранито-гнейсами с прослоями кристаллических сланцев.

Рассматриваемый участок находится в зоне распространения многолетнемерзлых пород (ММП). Мощность толщи ММП составляет от 100 до 300 м, мощность сезонно-талого слоя в летний период не превышает нескольких метров.

Геомеханические испытания проводились как в правобережной, так и в левобережной штольнях, расположенных на высоте ~ 90 м по отношению к урезу реки, что потребовало большого объема подготовительных работ по доставке туда необходимого оборудования и материалов.

Подготовка опытных площадок проводилась в подошве выработок. Для этого на выбранных участках с помощью ручного инструмента производилась зачистка поверхности от лишней прочной породы, обрушившейся при проходке и подготовке выработки, производственного мусора и шлама, а также от мелких и отслаивающихся обломков скалы, залегающей в подошве. В ряде случаев мощность удаляемой породы была весьма значительной. Площадь опытных площадок превышала площадь штампов и составляла около $1,0 \text{ м}^2$.

Перед установкой штампов выполнялась инженерно-геологическая документация опытных площадок, а также зарисовка рельефа поверхности скального массива в направлении сдвига и в ортогональном направлении.

В процессе документации площадок фиксировались все трещины длиной более 10 см, определялись их азимуты и углы падения, ширина и длина, тип заполнителя, наличие льда в трещинах.

В правобережной и левобережной штольнях на 12 площадках с бетонными штампами было проведено 24 опыта на сдвиг по контакту «бетон-скала». При этом первый сдвиговой опыт проводился до момента условного достижения сдвиговой прочности, определяемого по заметному росту показаний измерительных приборов, второй опыт – до реального достижения предельной прочности на сдвиг $\tau_{пр}$, сопровождаемого большими смещениями и снижением сдвиговой прочности до остаточной $\tau_{ост}$. Приповерхностная область массива при проведении всех сдвиговых опытов находилась в талом состоянии. Сдвиги проводились по безмоментной схеме. Последняя достигалась передачей сдвигающей нагрузки под некоторым наклоном к горизонтали.

Результаты сдвиговых опытов, выполненных в разных зонах массива, приведены на рисунке.

Красным цветом обозначены результаты, полученные в зоне III относительно сохранных пород, синим – в зоне II слабой разгрузки, зеленым – в зоне ПТ повышенной трещиноватости. Из рисунка видно, что отличие в величине прочности на сдвиг указанных зон массива обусловлено большим различием в значениях сцепления c (от 0,44 МПа в зоне ПТ до 1,35 МПа в зоне III) при близких значениях коэффициентов трения $\text{tg}\varphi = 1,18\text{--}1,29$. Отсутствие значимого различия в коэффициентах трения массива в зонах II и III может быть связано с небольшим количеством опытов, выполненных в зоне сохранных пород (всего 4 опыта).

Рис. Зависимости прочности на сдвиг $\tau_{пр}$ от нормального давления σ , полученные в разных инженерно-геологических зонах массива

После выполнения сдвиговых опытов штампы опрокидывались для выявления поверхности, по которой произошел сдвиг (срыв) штампа. Визуальное рассмотрение поверхностей сдвига показало, что почти на всех штампах они частично прошли по контакту бетон-скала, частично – по массиву. Отсюда можно сделать вывод, что полученные значения прочности на сдвиг характеризуют как прочность контакта «бетон-скала», так и верхней зоны массива.

При назначении расчетных параметров прочности на сдвиг основания за «отправную точку» были приняты результаты 14-ти опытов, выполненных в зоне II, которая будет служить основанием будущей плотины.

Крупномасштабные опыты в Узбекистане

Штамповые исследования были проведены в опытной штольне, расположенной на правом берегу реки, на участке створа строящейся плотины высотой 200 м. Было назначено шесть опытных площадок для проведения исследований на бетонных штампах размером 70×70×70 см. Опытные площадки расположены в породах неогенового возраста, представленных массивно-слоистыми алевритами. Приповерхностная область массива при проведении всех сдвиговых опытов находилась в водонасыщенном состоянии.

Путем статистической обработки полученных результатов были получены следующие нормативные значения сдвиговых параметров – коэффициента трения $\text{tg}\varphi$ и сцепления C : $\text{tg}\varphi_n = 1,40$, $C_n = 0,47$ МПа.

Соответствующая кулоновская зависимость предельной прочности на сдвиг от величины приложенного к штампу нормального давления имеет следующий вид: $\tau_{пр} = (1,40\sigma + 0,47)$ МПа.

Для получения расчетных сдвиговых параметров необходимо полученные нормативные значения $\text{tg}\varphi_n$ и C_n разделить на коэффициент надежности по грунту γ_g .

В соответствии с рекомендациями СП 23.13330.2011 «Основания гидротехнических сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.02-85» [3], значение γ_g следует определять по ГОСТ 20522-2012 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний» [1] при односторонней доверительной вероятности $\alpha = 0,95$. Выполненные расчеты показали, что коэффициент надежности по грунту в данном случае составляет $\gamma_g = 1,33$. Принимая во внимание положение СП 23.13330.2011 (п.5.16) [3], в соответствии с которым при коэффициенте надежности по грунту $\gamma_g > 1,25$ принимается значение $\gamma_g = 1,25$, получены следующие значения расчетных характеристик: $\text{tg}\varphi_p = 1,12$ и $C_p = 0,38$ МПа.

Кроме коэффициента надежности по грунту γ_g рекомендациями СНиП 2.02.02-85 «Основания гидротехнических сооружений» [2] и СП 23.13330.2011 [3] предусмотрено введение дополнительного коэффициента запаса на возможное несоответствие между условиями проведения испытаний и натурными условиями. Учитывая это, а также полученный достаточно большой разброс опытных данных, вызвавший повышенное значение коэффициента γ_g , окончательно в качестве расчетных могут быть рекомендованы следующие значения сдвиговых параметров: $\text{tg}\varphi_p = 0,90$ и $C_p = 0,30$ МПа.

В выполненных опытах часть площади сдвига, приходящейся на скальный массив, в среднем составила 46%, приходящейся на контакт «бетон-скала» – 49% и на бетон – всего 5%. Таким образом, можно сделать вывод, что полученные в опытах значения параметров $\text{tg}\varphi$ и C характеризуют сдвиговую прочность как по контакту «бетон-скала», так и по приконтактной зоне массива. С некоторым допущением можно считать обе эти прочности одинаковыми.

Полученные сдвиговые характеристики массива заметно превышают предварительные расчетные показатели, приведенные в материалах ТЭО.

Крупномасштабные опыты в Лаосе

Геомеханические исследования массива были выполнены на участке расположения построенной ГЭС с плотиной высотой 100 м. Исследования были выполнены на заранее оборудованных целиках, облицованных армированным бетоном. Всего было выполнено девять сдвиговых испытаний. В ходе полевых работ испытаниям были подвергнуты вулканогенно-осадочные породы, представленные светло-серыми туфо-алевролитами и туфо-песчаниками, интенсивно выветрелыми и превращенными в малопрочную породу.

Путем статической обработки полученных результатов были получены следующие нормативные значения сдвиговых параметров – коэффициента трения $\text{tg}\varphi$ и сцепления C : $\text{tg}\varphi_n = 0,65$, $C_n = 0,05$ МПа.

Соответствующая кулоновская зависимость предельной прочности на сдвиг от величины приложенного к целику нормального давления имеет следующий вид: $\tau_{пр} = (0,65 \sigma + 0,05) \text{ МПа}$.

Для получения расчетных сдвиговых параметров необходимо полученные нормативные значения $\text{tg}\varphi_n$ и C_n разделить на коэффициент надежности по грунту γ_g . Исходя из этого, по результатам сдвиговых опытов были рекомендованы следующие расчетные параметры прочности на сдвиг по массиву: $\text{tg}\varphi_p = 0,64$ и $C_p = 0,05 \text{ МПа}$.

Лабораторные геомеханические исследования включали в себя проведение опытов методом трехосного сжатия на отобранных из места проведения полевых работ образцах. Эти исследования были выполнены на трех образцах. По результатам лабораторных исследований и их статической обработки получены следующие расчетные параметры прочности на сдвиг по массиву: $\text{tg}\varphi_p = 0,40$ и $C_p = 0,02 \text{ МПа}$.

В этом случае параметры прочности на сдвиг, полученные полевыми опытами, существенно превысили данные лабораторных исследований.

Крупномасштабные опыты в Анголе

Целью геомеханических исследований являлось изучение в полевых условиях свойств трещин напластования и аргиллитовых прослоев, определяющих устойчивость сооружений напорного фронта и местную прочность основания плотины ГЭС Капанда высотой 110 м.

В пределах участка поведения опытов наблюдается тонкое переслаивание аргиллитов и песчаников. Мощность аргиллитов колеблется от 0,1 до 4,0–5,0 мм, а песчаников – от 5 до 10–15 мм. По отдельным прослоям аргиллитов отмечены примазки глинистого материала, которые, вероятно, образовались в результате разрушения выветрелых аргиллитов в процессе выполнения опытов.

Полевые геомеханические исследования по определению параметров сопротивления сдвигу субгоризонтальной трещины с прослоем аргиллита, были выполнены в нише камеры на шести целиках площадью 2 м². При проведении подготовительных работ по разборке и бетонированию целиков были обеспечены условия для максимально возможного сохранения природной структуры целика, предотвращения его разгрузки и разрушения. Во время бетонирования целиков в теле бетонной обоймы были установлены пластиковые трубы, использовавшиеся для водонасыщения прослоя аргиллита. Измерения перемещений проводили в вертикальном и горизонтальном направлениях. При сдвиге целиков не происходило роста нагрузки в домкратах вертикального нагружения, что свидетельствует о плоском характере сдвига по трещине.

По окончании опытов целики были опрокинуты для осмотра образовавшейся поверхности сдвига. Было установлено, что весь прослой аргиллита мощностью 7–10 мм остался «сцепленным» с целиками, а скала в

основании целиков покрыта слоем глинистой примазки толщиной около 1 мм серо-зеленого цвета.

Такой характер поверхностей разрушения свидетельствует о том, что сдвиг происходит именно по этому тонкому слою (примазке) влажного глинистого материала толщиной до 1 мм, подстилающему слой аргиллита, а не по более прочному слою аргиллита, как это представлялось до постановки полевых опытов. Этим можно объяснить значительное снижение нормативной величины сцепления, полученное в натурных исследованиях на скальных целиках по сравнению с лабораторными сдвигами по трещинам в аргиллитах без указанного глинистого материала: в полевых исследованиях величина $C_n = 0,06$ МПа против $C_n = 0,16$ МПа по лабораторным испытаниям. Величины $tg\varphi_n$ получены достаточно близкими (0,57 – полевые исследования и 0,54 – лабораторные опыты).

ГЭС Капанда была введена в эксплуатацию в 2007 г. и в настоящее время является основным поставщиком электроэнергии для региона и входит в десятку наиболее масштабных гидротехнических сооружений Африканского континента.

Выводы

1. Определение сдвиговых свойств образцов, отобранных из скальных массивов в лабораторных условиях, как правило, дает неудовлетворительные (завышенные или заниженные) результаты, в связи с тем что в лаборатории испытываются только сохранные, не трещиноватые образцы, в то время как сдвиговые свойства образцов, отобранных из скальных массивов, в первую очередь зависят от степени и характера трещиноватости, размеров блоков породы, направления сжимающей силы по отношению к элементам залегания породы и преобладающим системам трещин, а также от других факторов, которые не могут быть учтены при лабораторных испытаниях.
2. Результаты исследований подтверждают большую важность правильного назначения сдвиговых характеристик по потенциальным поверхностям смещения. Для этого необходимо проведение соответствующих полевых опытов на характерных участках массива и на фрагментах сдвигоопасных трещин.

Список литературы

1. ГОСТ 20522-2012 Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.
2. СНиП 2.02.02-85 Основания гидротехнических сооружений.
3. СП 23.13330.2011 «СНиП 2.02.02-85 Основания гидротехнических сооружений».

R.S. Zyuzin, A.S. Gurov, V.K. Vavilova

Branch of the Institute Hydroproject JSC – Service Center for Geodynamic Observations in the Power
Industry, Moscow, roman_277703@inbox.ru

ON THE ROLE OF LARGE-SCALE SHEAR TESTS IN THE DESIGN GEOMECHANICAL CHARACTERISTICS ASSIGNMENT

Abstract. The publication presents the main results of geomechanical studies performed at the rock foundations of four high dams designed and built in Russia (Republic of Sakha (Yakutia)), Uzbekistan, Laos, and Angola. Authors analyze the results of shear tests of concrete stamps and pillars. The number of tests made it possible to assess the strength characteristics in different zones of the dams' foundations. The publication presents a comparison of the strength characteristics of the rock mass obtained by the large-scale field and laboratory tests. The results of tests were used to design geomechanical characteristics of the rock foundations at the dam sites.

Key words: rock foundation; large-scale field test; shear test; strength characteristics.

Матвеев В.В.¹, Фадеев Е.А.², Шевцов М.О.¹, Шанина В.В.²

¹ООО «ГеоГрадСтрой», г. Москва, geogradlab@yandex.ru

²МГУ имени М.В. Ломоносова, геологический факультет,
кафедра инженерной и экологической геологии, г. Москва

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПРЕДУПЛОТНЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ г. МОСКВЫ)

Аннотация. За последние 85 лет был предложен ряд методов для оценки напряжения предуплотнения. Концепция напряжения предуплотнения чрезвычайно полезна в геотехнике для анализа и прогнозирования поведения грунтового массива. Однако определение напряжения предуплотнения зачастую встречает трудности реализации ввиду сложностей при графических построениях, которые подвержены некоторой неопределенности. В работе приводится сравнение точности и прецизионности методов, включенных в актуальную редакцию ГОСТ Р 58326-2018 «Грунты. Метод лабораторного определения параметров переуплотнения», с методами Пашеко Силвы и Вана-Фроста (рассеянной энергии деформации DSEM). В заключении приводятся рекомендации для повышения точности.

Ключевые слова: напряжение предуплотнения; рассеянная энергия деформации.

Введение

В настоящее время вопрос определения параметров переуплотнения грунтов весьма актуален. За последние 85 лет предложен ряд методов для оценки напряжения предуплотнения [5, 8]. Однако способы обработки, представленные различными исследователями, могут давать существенно отличающиеся друг от друга результаты. Существующие неточности, недостатки, разночтения в определении данных параметров грунтов влияют на точность оценки напряженно-деформированного состояния массива [6].

Методы определения напряжения предуплотнения

Метод Казагранде включен в ГОСТ Р 58326-2018 «Грунты. Метод лабораторного определения параметров переуплотнения» [2].

В этом методе все построения проводятся на графике зависимости коэффициента пористости e от логарифма вертикального напряжения $\lg \sigma$. В логарифмических координатах идеализированная компрессионная кривая в довольно широком интервале вертикальных напряжений имеет линейный характер в случае нормально уплотненного грунта, и билинейный – в случае переуплотненного: первый участок соответствует ветви рекомпрессии, а второй – ветви первичного сжатия [10] (рис. 1, а).

В методе Казагранде присутствуют сложности, связанные с графическими построениями и наличием субъективного фактора. Испытания должны быть

проведены до таких величин вертикальных напряжений, при которых обеспечивается достоверный выход на линию первичного сжатия для корректного построения касательной к конечному участку.

Еще одним субъективным фактором является проведение касательной к точке максимальной кривизны, вследствие тех же причин. Биссектриса представляет собой среднее значение крайних случаев, а именно минимальный и максимальный углы наклона горизонтальной прямой и касательной в точке с наименьшим радиусом кривизны. И таким образом, является оценкой, осредняющей два крайних значения. Помимо этого, построение биссектрисы в пространстве различных размерностей абсурдно, что приводит к искажениям вследствие выбора масштабов по осям напряжений и коэффициента пористости [12]. Следует отметить, что в ГОСТ Р 58326-2018, приложение Г, предлагается модификация этого метода, упрощающая выбор точки наибольшей кривизны [2].

Метод Беккера также включен в ГОСТ Р 58326-2018 [2].

Согласно методу Беккера, значение напряжения предуплотнения σ_c находится по графику зависимости работы деформации на единицу объема W от вертикального напряжения σ . Полученная зависимость, как правило, имеет два линейных участка. Напряжение, соответствующее точке пересечения двух прямых, проведенных к линейным участкам кривой, соответствует напряжению предуплотнения [14] (рис. 1, б).

Соответственно, к недостаткам метода можно отнести также наличие субъективного фактора при графических построениях, в частности сложность в выборе линейных участков, к которым проводятся прямые. Помимо этого, для расчета удельной энергии на каждой ступени используется интегрирование методом средних прямоугольников, который для аппроксимирующей аналитической зависимости может быть заменен методом непосредственного интегрирования.

Метод Пашеко Силвы рассматривался разработчиками ГОСТ Р 58326-2018 [2], однако в окончательную редакцию стандарта не был включен. Этот метод широко применяется в Бразилии [8].

Для построений используется тот же график, что и в методе Казагранде. Напряжение предуплотнения определяется графически, как показано на рис. 1, в. Метод отличается простотой графических построений, а результат не зависит от масштаба осей графика [9, 11].

Метод Вана-Фроста (метод рассеянной энергии деформации DSEM) относится к группе энергетических методов. По сравнению с другими энергетическими методами, такими как Беккера, здесь используется рассеянная энергия деформаций [13].

Особенность метода Вана-Фроста – использование петли разгрузки и повторной нагрузки в построениях, что позволяет минимизировать эффект частичного нарушения структуры образца при отборе и пробоподготовке, а также устранить влияние упругой деформации.

Общая деформация является суммой пластических и упругих деформаций. Чтобы отделить пластическую деформацию от общей деформации достаточно из общей деформации вычесть упругую.

На рис. 1, 2 представлена собственно компрессионная кривая RUYX. Участок RU соответствует рекомпрессии, UY – выходу на линию первичного сжатия, YX – разгрузке. Линия, содержащая отрезок UY, соответствует энергии общей деформации, а линия, параллельная YX, – упругой деформации. Разность полученных линий – линия рассеянной энергии деформаций, пересечение которой с осью абсцисс даст искомое напряжение предуплотнения.

а

б

в

г

Рис. 1. Построения для определения напряжения предуплотнения различными методами:
а – Казагранде, б – Беккера, в – Пашеко Силвы, г – Вана-Фроста

По заявлению авторов метода Вана-Фроста, он менее зависим от оператора, чем большинство методов.

Объекты и методика исследований

Для проведения испытаний были подготовлены образцы нарушенного сложения из монолитов грунтов, отобранных на участке инженерно-геологических изысканий в районе Саларьево (г. Москва). Для исследований выбрали моренные и флювиогляциальные суглинки и глины четвертичного возраста.

Из образцов грунта была изготовлена паста текучей консистенции. Грунт растирали, а затем водонасыщали до текучего состояния с влажностью, превышающей в 1,5–2,0 раза влажность на пределе текучести, затем определяли влажность полученной пасты. Паста текучей консистенции использовалась с целью представления грунта в начале процесса седиментации в состоянии нормального уплотнения.

Для определения напряжения предуплотнения грунта проведены испытания методом компрессионного сжатия в соответствии с ГОСТ 12248.4-2020 «Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия» [1] и ГОСТ Р 58326-2018 [2] в приборах ГТ 1.1.4–01 ООО НПП «Геотек» (г. Пенза) при максимальных ступенях нагрузок до 2,5 МПа. Испытания проводились в двух типах одометров: с диаметром и высотой кольца – 72×20 и 86×25 мм. Полученные данные были обработаны методами Казагранде, Беккера, Пашеко Силвы и Вана-Фроста (см. рис. 1).

Испытания проводились в два этапа. Схема испытаний для первого этапа была составлена таким образом, чтобы смоделировать рост напряжения в грунте в процессе его седиментации, достижения им заданного максимального исторического давления при наступлении ледника, с последующей декомпрессией при отступлении ледника, а также в процессе извлечения образца на поверхность при пробоотборе.

Второй этап моделировал собственно лабораторное испытание грунта методом компрессионного сжатия в одометре, после извлечения образца из массива грунта. Для этого грунтовая паста нагружалась ступенями начиная с 6 кПа. Каждая последующая ступень принималась в два раза больше предыдущей. Максимальное напряжение по первой ветви нагрузки составляло 800 либо 600 кПа, выбор таких значений обусловлен ограничениями испытательной установки. Первая ветвь нагружения соответствует ветви первичной компрессии. Затем проводилась постепенная полная разгрузка образца. После этого образец нагружался по схеме первой ветви, но до максимального напряжения 1500 или 2500 кПа.

Перегиб на второй ветви должен соответствовать переходу образца из зоны рекомпрессии в зону первичного сжатия. Такой последовательностью

действий возможно показать всю историю нагрузок и подробно воссоздать природные напряжения, при которых существовал грунт.

Результаты исследований и их обсуждение

Напряжения предуплотнения, заданные (600 и 800 кПа) и полученные при обработке методами Казагранде, Беккера, Пашеко Силвы и Вана-Фроста, представлены в табл. 1, а их сопоставление – на рис. 2.

Таблица 1

Заданные и полученные различными методами значения напряжения предуплотнения

Номер образца	Заданные значения σ_c , кПа	Полученные значения σ_c , кПа			
		Метод			
		Казагранде	Пашеко Силвы	Беккера	Вана-Фроста
GJ6840	800	850	720	900	860
GJ6838	600	710	600	700	650
GJ6890	600	640	600	680	700
GJ6874	600	640	640	650	670
GJ6895	800	800	650	850	830
GJ68B3	800	650	650	830	800
GJ6898	600	630	540	620	620
GJ68A0	600	600	470	610	600
GJ6864	800	790	700	800	850
GJ6835	800	810	770	800	830
GJ6888	600	590	460	600	590
GJ6885	800	700	610	770	810

Основные принципы и методы измерений регламентированы шестью международными стандартами от ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения» [3] до ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002 «Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике» [4], где основными показателями точности измерений являются правильность и прецизионность. Термин «правильность» характеризует близость измеренного среднего

арифметического к принятому опорному значению, а «прецизионность» – степень близости измеренных значений друг к другу.

Рис. 2. Сравнение заданных и полученных значений напряжения предуплотнения σ_c , кПа

Показателем правильности обычно является поправка, вычисляемая как разность между опорным и средним арифметическим значениями, прецизионность оценивается средним квадратичным отклонением (СКО).

Проведя анализ значений, представленных в табл. 2, можно сделать вывод, что оценка точности для всех методов при компрессионных испытаниях, проведенных в статическом режиме с удвоением ступеней нагружения, примерно равна СКО абсолютной погрешности и составляет от 33 до 73 кПа, что согласуется с результатами ранее проведенных исследований [12].

Метод Пашеко Силвы систематически занижает значения, абсолютная погрешность составила –83 кПа, тем самым метод дает более консервативную оценку напряжения предуплотнения.

При обработке методом Казагранде абсолютная погрешность нивелировалась, что свидетельствует об отсутствии систематического отклонения, однако следует обратить внимание на разброс значений, СКО абсолютной погрешности составило 68 кПа.

Энергетические методы, Беккера и Вана-Фроста, дают схожие результаты, что и ожидаемо, ведь оба метода имеют один принцип действия. Абсолютная погрешность составила 34 кПа для обоих методов. Однако при испытании образцов, извлеченных из грунтового массива, участок рекомпрессии, как правило, не носит выраженного характера и использование разгрузки будет полезным для его восстановления.

Таблица 2

Метрологические характеристики методов определения напряжения предуплотнения (σ_c) для
компрессионных испытаний, проведенных в статическом режиме
с удвоением ступеней нагружения

Метод	Абсолютная погрешность $\Delta\sigma_c$, кПа	СКО абсолютной погрешности, кПа	Относительная погрешность $\delta\sigma_c$, %	СКО относительной погрешности, %
Казагранде	1	68	0,8	9,5
Пашеко Силвы	–83	73	–11,3	10,3
Беккера	34	42	5,2	6,3
Вана–Фроста	34	33	5,1	5,3

Заключение

Выявлены некоторые слабые стороны методов определения напряжения предуплотнения σ_c , такие как: сложности с выбором касательных при графических построениях и субъективный фактор при таком выборе.

Для повышения точности построений рекомендуется в схемах компрессионных испытаний использовать либо меньшие приращения ступеней, либо кинематический режим, что согласуется с результатами предыдущих исследователей [7, 12].

Интерпретация испытаний требует высокой квалификации от исследователя. Для обработки данных необходимо использование как минимум двух независимых построений, проводимых параллельно для каждого из методов.

Для повышения уровня достоверности определения параметров переуплотнения необходимо использовать параллельно несколько методов обработки компрессионной кривой. Такой подход обеспечит взаимный контроль результатов и позволит исключить грубые ошибки интерпретации испытаний.

Список литературы

1. ГОСТ 12248.4-2020 Грунты. Определение характеристик деформируемости методом компрессионного сжатия.
2. ГОСТ Р 58326-2018 Грунты. Метод лабораторного определения параметров переуплотнения.
3. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения.

4. ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике.
5. Крамаренко В., Никитенков А. О структурной прочности глинистых грунтов территории Томской области // Известия ТГУ. 2014. С. 1–16.
6. Лузин И.Н. Напряженно-деформированное состояние оснований фундаментов глубокого заложения на однородном и неоднородном переуплотненном грунтовом полупространстве: дисс. ... канд. техн. наук. М.: НИУ МГСУ, 2017. 133 с.
7. Мельников Р.В., Попков А.А. Применение метода Беккера для определения давления предварительного уплотнения при кинематическом режиме компрессионного испытания // Геотехника. 2016. № 6. С. 54–59.
8. Методы определения параметров переуплотнения грунтов и их практическое применение в условиях Санкт–Петербурга / А.Н. Труфанов, О.А. Шулятьев, А.В. Ростовцев, Г.У. Габсалямов // Инженерные изыскания. 2014. № 11. С. 32–39.
9. Boone S.J. A critical reappraisal of “preconsolidation pressure” interpretations using the oedometer test // Canadian Geotechnical Journal. 2010. Vol. 47. No. 3. P. 281–296. <https://doi.org/10.1139/T09-093>.
10. Casagrande A. The determination of the preconsolidation load and its practical significance // Proceedings of the 1st International Conference on soil mechanics and foundation engineering. Cambridge: Harvard Printing Office, 1936. Vol. 3. P. 60–64.
11. Pacheco Silva F. A new graphical construction for determination of the preconsolidation stress of a soil sample // Proceedings of the 4th Brazilian Conference on soil mechanics and foundation engineering. Rio de Janeiro, 1970. Vol. 2. No. 1. P. 225–232.
12. Umar M., Sadrekarimi A. Accuracy of determining pre–consolidation pressure from laboratory tests // Canadian Geotechnical Journal. 2016. Vol. 54. No. 3. P. 441–450. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0203>.
13. Wang L., Frost J.D. Dissipated strain energy method for determining preconsolidation pressure // Canadian Geotechnical Journal. 2004. Vol. 41. No. 4. P. 760–768. <https://doi.org/10.1139/t04-013>.
14. Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays / D.E. Becker, J.H.A. Crooks, K. Been, M.G. Jefferies // Canadian Geotechnical Journal. 1987. Vol. 24. No. 4. P. 549–564.

V.V. Matveev¹, E.A. Fadeev², M.O. Shevtsov¹, V.V. Shanina²

¹GeoGradStroy LLC, Moscow, geogradlab@yandex.ru

²Lomonosov Moscow State University, Moscow

**ASSESSMENT OF THE ACCURACY OF MEASUREMENT METHODS
FOR INTERPRETATION OF PRECONSOLIDATION PRESSURE
(A STUDY OF THE CLAY SOILS IN MOSCOW)**

Abstract. Over the past 85 years, a number of methods have been proposed for the interpretation of preconsolidation pressure. The concept of the “preconsolidation pressure” has been extraordinarily useful in geotechnical engineering for analysing and predicting soil body behaviour. Defining this characteristic stress, however, is often problematic and relies heavily on graphical techniques that are subject to some uncertainty. This publication contains a comparison of the accuracy and precision of the methods included in the current version of the state standard GOST R 58326-2018 «Soils. Laboratory method for determining the overconsolidation characteristics» with the methods of Pacheco Silva and Wang-Frost (dissipated strain energy method). It concludes with recommendations for improving accuracy.

Key words: preconsolidation pressure; dissipated strain energy.

Никитин С.Н.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, niksn@ifz.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОФИЛИРОВАНИЯ ДЛЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО МИКРОРАЙОНИРОВАНИЯ

Аннотация: описывается нестандартный метод обработки результатов вертикального сейсмического профилирования для задач сейсмического микрорайонирования.

Ключевые слова: сейсмическое микрорайонирование; сейсмические свойства грунтов; скорость поперечных волн; сейсмическая жесткость.

1. Скорость распространения (фазовая скорость) поперечных волн V_s – важная характеристика упругих свойств геологической среды, используемая в сейсмическом микрорайонировании (СМР) [1–5, 8, 9, 11]. В табл. 1 представлены методы СМР и варианты использования скоростных свойств грунтов в соответствии с нормативными техническими документами (НТД).

Таблица 1

Использование скоростных свойств грунтов в методах СМР

Метод СМР	НТД	Параметр геологической среды	Применение
Инженерно-геологический метод (ИГМ)	СП 14.13330.2014 [8], СП 14.13330.2018 [9]	$V_s, \text{мс}^{-1}$	Определение категории грунтов по сейсмическим свойствам (Таблица 4.1)
Метод сейсмических жесткостей (МСЖ)	РСН 60-86 [4], РСН 65-87 [5]	$V_s, \text{мс}^{-1}$	Определение сейсмической жесткости, как произведение объемной плотности в естественном залегании на скорость распространения поперечных волн (ρV_s), $\text{тм}^{-2}\text{с}^{-1}$
Метод решения прямой задачи (МПЗ)	СП 283.1325800.2016 [11]	$V_s, \text{мс}^{-1}$	Определение сейсмической жесткости, как произведение объемной плотности в естественном залегании на скорость распространения поперечных волн (ρV_s), $\text{тм}^{-2}\text{с}^{-1}$

2. Для определения скоростей распространения поперечных волн V_s в грунтах используются различные геофизические методы. Все методы имеют

свои преимущества и недостатки, а также стоимость и сроки исполнения работ. В табл. 2 представлены методы определения скоростных параметров геологической среды для СМР.

Таблица 2

Методы определения скоростных параметров геологической среды для СМР

Метод определения скорости V_s , мс ⁻¹	НТД	Недостатки
Метод преломленных волн (МПВ, КМПВ)	РСН 65-87 [5] СП 151.13330.2012 [10] СП 283.1325800.2016 [11] СП 358.1325800.2017* [12]	1) Слабая дифференцированность скоростных разрезов 2) Погрешность при наличии инверсных слоев 3) Уменьшение детальности с глубиной
Метод отраженных волн (МОВ, МОГТ)	СП 151.13330.2012 [10] СП 283.1325800.2016 [11] СП 358.1325800.2017* [12]	Уменьшение детальности с глубиной
Метод высокоразрешающей сейсморазведки на поперечных волнах SH-волнах (ВСПВ)	СП 283.1325800.2016 [11] СП 358.1325800.2017* [12]	—
Методы спектрального анализа поверхностных волн (SASW, MASW)	СП 283.1325800.2016 [11] СП 358.1325800.2017* [12]	1) Слабая дифференцированность скоростных разрезов 2) Уменьшение детальности с глубиной
Межскважинное сейсмоакустическое просвечивание (МСП, ТСП)	СП 151.13330.2012 [10] СП 283.1325800.2016 [11] СП 358.1325800.2017* [12]	1) Сложность управления источником; 2) Стоимость
Вертикальное сейсмическое профилирование (ВСП)	СП 151.13330.2012 [10] СП 283.1325800.2016 [11] СП 358.1325800.2017* [12]	—

Примечание: *Выбор методов геофизических исследований обосновывается в программе работ в зависимости от решаемых задач и локальных особенностей исследуемой площадки.

3. Использование вертикального сейсмического профилирования (ВСП) для СМР предпочтительно. Стандартное применение ВСП (рис. 1) позволяет:

- исследовать изменчивость скоростных характеристик в грунтовой толще;
- более точно определять пластовые скорости;

- инструментально измерять среднюю скорость распространения упругой волны в грунтовой толще;
- учитывать заглубление фундамента.

Рис. 1. Использование ВСП для исследования скоростных характеристик грунтовой толщи:
а – время распространения волны от источника до приемника; б – изменение средней и интервальной скорости с глубиной; в – инженерно-геологическая структура исследуемой скважины

4. Более существенную информацию об изменчивости скоростных характеристик в грунтовой толще дает статистическая обработка интервальных скоростей.

Формирование массива интервальных скоростей (рис. 2) для статистической обработки данных ВСП для СМР:

- сопоставление инженерно-геофизических и инженерно-геологических данных;
- исключение пограничных интервальных скоростей;
- исключение некорректных интервальных скоростей.

Рис. 2. Формирование массива интервальных скоростей для статистической обработки данных

5.1. Статистическая обработка данных (табл. 3) ВСП для СМР позволяет получить для характеристики инженерно-геологического элемента (ИГЭ):

- корреляцию скоростных и лито-петро-генетических параметров (V_s среднее для ИГЭ);
- количественную оценку изменчивости (коэффициент вариации) скоростных характеристик структурного элемента для модели сейсмогрунтовых условий.

Таблица 3
Результаты статистической обработки результатов ВСП для СМР

№ ИГЭ	Среднее значение V_s , м/с	Дисперсия	Среднее квадратическое отклонение	Коэффициент вариации
11	202,90	914,71	30,24	0,15
21	211,40	1041,18	32,27	0,15
22	265,14	1996,77	44,69	0,17
31	602,18	7815,60	88,41	0,15
41	876,92	13824,87	117,58	0,13
51	419,64	4323,70	65,75	0,16
61	920,82	42786,20	206,85	0,22

5.2. А также дополнительно получают рис. 3, 4:

- статистическое распределение скоростных характеристик в ИГЭ и грунтовой толще;
- наиболее вероятное (а не среднее) значение скорости в ИГЭ по статистическому распределению;
- «консервативное» (меньшее в диапазоне наиболее вероятных значений) значение скорости в ИГЭ по статистическому распределению.

Рис. 3. Статистическое распределение скоростных характеристик в ИГЭ-451 (V_s среднее = 427 м/с, V_s наиболее вероятное = 400 м/с, V_s «консервативное» = 300 м/с)

Рис. 4. Статистическое распределение скоростных характеристик в ИГЭ-639 (V_s среднее = 735 м/с, V_s наиболее вероятное = 850 м/с, V_s «консервативное» = 350 м/с)

5.3.1. Особый интерес для исследования упругих свойств грунтового массива представляет локальная корреляция скоростных и деформационных параметров (V_s – E_{ur}) для дисперсных грунтов, полученная по результатам корреляционно-регрессионного анализа инженерно-геофизических и инженерно-геологических данных (рис. 5).

Рис. 5. Зависимость скорости распространения поперечных волн V_s от модуля упругой деформации E_{ur} , полученного в стабилометре при разгрузке

5.3.2. Чаще производятся полевые и лабораторные определения модуля общей деформации $E_{деф}$. Поэтому для практики представляет интерес локальная корреляция скоростных и деформационных параметров (V_s – $E_{деф}$) для дисперсных грунтов (рис. 6).

Рис. 6. Зависимость скорости распространения поперечных волн V_s от модуля общей деформации $E_{деф}$

5.3.3. Для скальных грунтов (рис. 7) получаем локальную корреляцию скоростных и прочностных параметров (V_s – $R_{сж}$).

Рис. 7. Зависимость скорости распространения поперечных волн V_s от прочности на одноосное сжатие

5.4.1. Когда мощность ИГЭ большая, может наблюдаться изменчивость скоростных свойств от глубины (рис. 8).

Рис. 8. Зависимость скорости распространения поперечных волн V_s от глубины h для ИГЭ-21

5.4.2. Не бесполезными бывают другие локальные закономерности, полученные по результатам корреляционно-регрессионного анализа. К примеру, зависимость пористости от плотности (рис. 9).

Рис. 9. Зависимость коэффициента пористости от объемной плотности

Выводы

Вертикальное сейсмическое профилирование, как геофизический метод для получения исходных данных о структуре грунтовой толщи и упругих (скоростных) свойствах грунтов, слагающих эту толщу, зарекомендовал себя очень положительно и следует включить его в стандартный комплекс СМР.

Список литературы

1. Алешин А.С. Континуальная теория сейсмического микрорайонирования. М.: Научный мир, 2017. 300 с.
2. Алешин А.С. О спектральных характеристиках грунтовой толщи // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 5. С. 16–23.
3. Алешин А.С., Погребченко В.В., Никитин С.Н. Решение прямой задачи как новый метод сейсмического микрорайонирования // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021. № 2. С. 38–53. <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-2-38-53>.

4. РСН 60-86 Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ. М.: Госстрой РСФСР, 1986. 32 с.
5. РСН 65-87 Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Технические требования к производству работ. М.: Госстрой РСФСР, 1987. 25 с.
6. Скворцов А.Г. Высокоразрешающая сейсморазведка на поперечных волнах при изучении верхней части геологической среды // Сборник конференции «Инженерная геофизика-2005». М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 2005. С. 16–18.
7. Скворцов А.Г. Возможности и специфика использования отраженных волн в инженерной сейсморазведке // Сборник тезисов научно-практической конференции «Инженерная сейсморазведка-2018». М.: Евроазиатская научно-промышленная палата, 2018. С. 8–12.
8. СП 14.13330.2014 Строительство в сейсмических районах.
9. СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах».
10. СП 151.13330.2012 Инженерные изыскания для размещения, проектирования и строительства АЭС. Часть I–II.
11. СП 283.1325800.2016 Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования.
12. СП 358.1325800.2017 Сооружения гидротехнические. Правила проектирования и строительства в сейсмических районах.

S.N. Nikitin

Shmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, niksn@ifz.ru

APPLICATION OF VERTICAL SEISMIC PROFILING FOR SEISMIC MICROZONING

Abstract: it is described a non-standard method for processing the results of vertical seismic profiling for seismic microzoning.

Key words: seismic microzoning; seismic properties of soils; shear wave velocity; seismic stiffness.