

На правах рукописи



Лавров Сергей Николаевич

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ДЕФОРМАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ РАСКЛИНИВАЮЩИМ ДИЛАТОМЕТРОМ
В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ**

Специальность 25.00.08 –

Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискании ученой степени

кандидата технических наук

Барнаул – 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет. (Сибстрин)»

Научный

руководитель:

кандидат технических наук, профессор

Нуждин Леонид Викторович

**Официальные
оппоненты:**

- доктор геолого-минералогических наук, профессор

Ольховатенко Валентин Егорович

(ФГБОУ ВПО «Томский государственный архитектурно-строительный университет»)

- кандидат технических наук, доцент

Халтурина Лариса Васильевна

(ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»)

Ведущая организация: ОАО «Сибгипротранс» (г. Новосибирск)

Защита состоится 28 октября 2011 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.09 в ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 656038, г.Барнаул, пр. Ленина, 46.

<http://www.altstu.ru>; ntsc@desert.secna.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.004.09. E-mail: karelina7@mail.ru.

Автореферат разослан __ сентября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



И.В. Карелина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Современное строительство в условиях рыночных отношений должно обеспечивать эффективность инвестиций и безопасность жизнедеятельности человека. Одним из эффективных путей достижения надежных и экономичных решений в фундаментах является повышение достоверности определения свойств грунтов основания.

Наибольшие трудности возникают при исследовании сжимаемости дисперсных грунтов. Испытание таких грунтов необходимо проводить в условиях их природного сложения и существующего напряженного состояния. Эти условия наиболее полно можно реализовать при полевых исследованиях, обеспечивающих минимальное нарушение естественного состояния грунтового массива. Традиционные методы определения модуля деформации грунтов имеют ограниченную область применения, сложны и трудоемки в изготовлении и применении, либо недостаточно надёжны в эксплуатации.

В настоящее время наряду с работами по совершенствованию существующих методов и оборудования, актуальной является проблема создания, обоснования и внедрения принципиально новых, экономичных и надежных методов и технических средств полевого определения модуля деформации дисперсных грунтов.

Одним из перспективных направлений развития полевых методов является разработка приборов релаксационного типа, которые позволяют существенно сократить продолжительность проведения испытаний сжимаемости грунтов при сохранении качества получаемой информации.

Авторским коллективом ЗапСибТИСИЗ предложено устройство для определения модуля деформации дисперсных грунтов в полевых условиях – расклинивающий дилатометр РД-100, конструкция которого позволяет реализовать метод релаксации напряжений. Для внедрения расклинивающего дилатометра в практику инженерно-строительных изысканий требуется проведение детальных исследований по обоснованию конструктивных и методических особенностей его использования.

Целью работы являются теоретические и экспериментальные исследования метода испытания дисперсных грунтов на сжимаемость расклинивающим дилатометром, разработка конструкции инденторов и методики по практическому применению дилатометров.

В работе решались следующие задачи:

1. Исследование напряженно-деформированного состояния грунтового массива при погружении клиновидного индентора;
2. Экспериментальные исследования конструктивных параметров расклинивающего дилатометра;
3. Обоснование требований к конструкции расклинивающего дилатометра;
4. Разработка методики определения модуля деформации дисперсных грунтов расклинивающим дилатометром;

5. Сопоставление результатов испытаний дисперсных грунтов расклинивающим дилатометром и стандартными методами определения модуля деформации грунтов.

Методы исследований. Поставленные в работе задачи решаются на базе использования методов конечных элементов в геомеханике, математической статистики, сравнительного анализа.

Экспериментальные исследования и сопоставления проводились на опытных полигонах и производственных объектах. Численное моделирование выполнялись с помощью специально разработанных программ для ПЭВМ "SPACE – А" и "SPACE – В".

Исходные данные и личный вклад автора. В основу работы положены материалы экспериментальных и теоретических исследований, выполненных автором в период с 1988 по 2010 гг. Диссертационная работа выполнялась в составе творческого коллектива предприятия ЗапСибТИСИЗ и кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты» НГАСУ (Сибстрин)

Автором проведены теоретические и экспериментальные исследования по обоснованию конструктивных параметров клиновидных инденторов, разработана методика проведения полевых испытаний для оценки деформационных свойств грунтов, проведен сравнительный анализ результатов испытаний дисперсных грунтов расклинивающим дилатометром со стандартными методами.

Научная новизна. Обоснована формула для определения модуля деформации грунтов расклинивающим дилатометром. Определены требования к оптимальным конструктивным параметрам прибора. Разработана методика работы по проведению испытаний дисперсных грунтов расклинивающим дилатометром.

Практическая значимость работы состоит в разработке полевого метода оценки деформационных свойств дисперсных грунтов с использованием в качестве рабочего наконечника индентора клиновидной формы, позволяющего реализовать метод релаксации напряжений.

Простота конструкции способствует высокой эксплуатационной надежности устройства в самых разнообразных грунтовых условиях, представленных классом дисперсных грунтов. Прибор и технология внедрены в ООО «НИЦа», ОАО «Стройизыскания», ОАО «Сибгипротранс», ООО «Гидропроект» (г. Новосибирск), «ОрелТИСИЗ», ЗАО ПИИ «Гипроводстрой» (г. Волгоград), ФГУП КГПИИ «ВНИПИЭТ» (г. Красноярск), ООО «ЮГК «Диамант» (г. Одесса) и других. Всего более 35 организаций.

По результатам опытно-экспериментальных исследований в 1991 г. ПНИИИС совместно с трестом ЗапСибТИСИЗ выпустили «Рекомендации по определению деформационных свойств грунтов расклинивающим дилатометром РД-100». В 2004 г. расклинивающий дилатометр был рекомендован к использованию в СП 11-114-2004 «Инженерные изыскания на континентальном шельфе для строительства морских нефтегазопромысловых сооружений».

Результаты диссертационных исследований рекомендуются к широкому внедрению при выполнении инженерных изысканий для строительства.

На защиту выносятся:

1. Результаты анализа напряженно-деформированного состояния грунта при погружении клиновидного индентора.
2. Результаты экспериментальных исследований по обоснованию конструктивных параметров клиновидного индентора.
3. Методика проведения испытаний дисперсных грунтов расклинивающим дилатометром.

Апробация работы. Основные результаты исследований докладывались на Международных научно-практических конференциях «Гетехника-99» (Россия, Пенза, 1999 г.), «Геотехника: наука и практика» (Россия, Санкт-Петербург, 2000 г.), «Современные проблемы фундаментостроения» (Россия, Волгоград, 2001 г.), «Coastal Geotechnical Engineering in Practice» (Казахстан, Атырау, 2002 г.), «Проблемы геотехники в современном строительстве и памятников архитектуры» (Узбекистан, Самарканд, 2002 г.), «Фундаментостроение в сложных инженерно-геологических условиях» (Санкт-Петербург, 2003 г.) «Гуманизм и строительство. Природа, этнос и архитектура» (Россия, Республика Алтай, 2003 г.), по геоэкологии и геотехнике (Азербайджан, Баку, 2003 г.), «Geotechnical problems on construction of large-scale and unique projects» (Казахстан, Алматы, 2004 г.), 4-ой и 5-ой Украинских научно-практических конференциях (Украина, Киев, Одесса, 2000 -2001 г.г.), 48-51 и 62-68 научно-технических конференциях НГАСУ (Сибстрин) (Россия, Новосибирск, 1991-1994 г.г. и 2005-2011 г.г.).

Публикации. По теме диссертационных исследований опубликовано 23 печатных работы, в том числе авторское свидетельство на изобретение. В рецензируемых изданиях, утвержденных ВАК, опубликовано 2 статьи.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 197 страниц, в том числе 59 рисунков, 28 таблиц, 11 страниц приложений. Список литературы содержит 171 наименование.

Краткое содержание работы

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цели и основные задачи исследований, отражены научная новизна и практическая значимость.

В первой главе приведен аналитический обзор и оценка существующих методов проведения испытаний по определению модуля деформации дисперсных грунтов в полевых условиях. Рассмотрена природа сжимаемости дисперсных грунтов, условия их деформирования под воздействием внешних нагрузок. Исследованию природы сжимаемости, в свете решения различных инженерно-геологических и строительных задач, посвящены работы А. Баракоса, Н.М. Герсеванова, М.Н. Гольдштейна, И.М. Горьковой, Б.И. Далматова,

Н.Я. Денисова, Р.С. Зиангирова, А. Казагранде, Н.В. Коломенского, В.Д. Ломтадзе, Н.Н. Маслова, Д. Митчела, Н.В.Орнатского, В.А.Приклонского, Е.М.Сергеева, Д. Тейлора, К. Терцаги, М.М. Филатова, В.А. Флорина, Г.И. Швецова, Н.А. Цыговича и других отечественных и зарубежных ученых.

Чрезмерная чувствительность дисперсных грунтов и, особенно глинистых, предъявляет повышенные требования к сохранению их природного сложения, что может быть достигнуто только полевыми методами исследования сжимаемости грунтов. Существующие полевые методы испытаний грунтов на сжимаемость по методу активного воздействия на грунты можно классифицировать как методы, которые используют в своей основе метод контролируемых напряжений (МКН) и метод контролируемых перемещений (МКП) или метод релаксации напряжений (рисунок 1). Оба метода используются для определения зависимости между нагрузками и осадками и отличаются друг от друга только соотношением управляемого и пассивно измеряемого параметров.

В настоящее время МКН является основным методом при проведении инженерных изысканий для строительства, он регламентирован действующими нормативными документами, при исследовании сжимаемости грунтов в полевых и лабораторных условиях. Для данного метода разработаны и выпускаются промышленностью приборы и оборудование для проведения испытаний штампами, прессиометрами и дилатометрами.

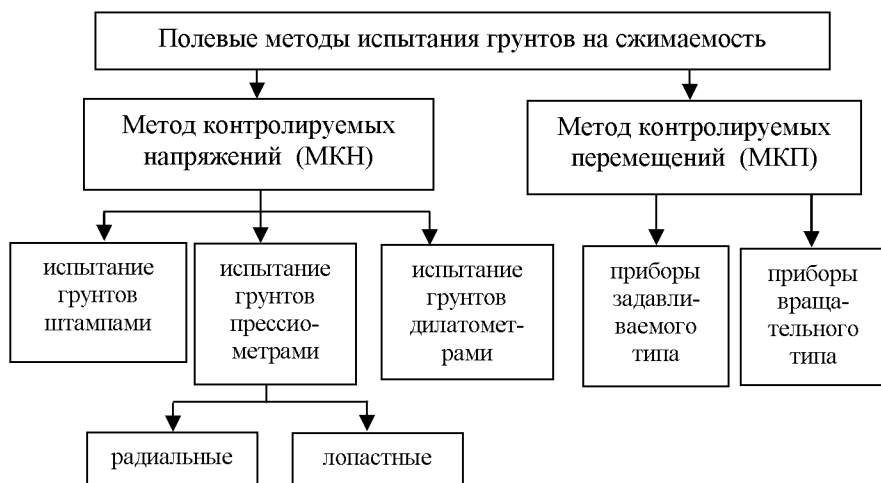


Рисунок 1 – Полевые методы испытания грунтов на сжимаемость

Второе направление относительно новое. Исследованием релаксации напряжений в грунтах занимались С.С. Вялов, М.Н. Гольдштейн, Н.Н. Маслов, С.Р. Месчан, Ю.С. Миренбург, В.П. Писаненко, А.Н. Труфанов, Н.А. Цыгович и другие исследователи.

Первоначально МКП использовался для проведения экспериментальных и опытных исследований грунтов. Особенно активно он применялся при исследовании мерзлых грунтов. Начиная, с конца 80-х годов прошлого столетия, стали появляться изобретения, проводиться эксперименты и целенаправленные исследования по использованию релаксационного метода. В результате этих исследований в 1991-1993 гг. были разработаны «Рекомендации по определению деформационных характеристик грунтов по методу релаксации напряжений в полевых и лабораторных условиях» и ГОСТ 5686-94 по испытанию грунтов сваями.

Таким образом, метод релаксации напряжений или МКП является перспективным направлением для исследований по разработке конструкций приборов и методов определения свойств грунтов в полевых и лабораторных условиях.

С 1986 г. в тресте «ЗапСибТИСИЗ» начали проводить эксперименты с использованием МКП, которые полностью подтвердили выводы предшественников о сокращении продолжительности испытаний (в 2-15 и более раз) при сохранении качества получаемой информации. По результатам экспериментов предложено устройство для определения модуля деформации грунтов в полевых условиях – расклинивающий дилатометр, в котором для создания контролируемых перемещений используется рабочий наконечник клиновидной формы (рисунок 2). При погружении такого индентора происходит плавное деформирование окружающего грунта на известные величины, а контактные напряжения, соответствующие этим перемещениям, измеряются встроенным в корпус датчиками давления.

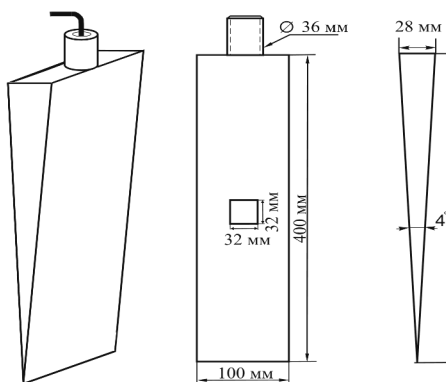


Рисунок 2 – Индентор клиновидной формы

Данный метод испытания грунтов требует выполнения исследований по обоснованию конструкции рабочего наконечника, выбору расчетной формулы для вычисления модуля деформации грунтов и разработке методики проведения самих испытаний.

Вторая глава посвящена моделированию работы клиновидного индентора в грунтовом массиве и оценке его влияния на напряженно-деформированное состояние (НДС) окружающего грунта.

Для выполнения численных расчетов в качестве индентора был принят абсолютно жесткий наконечник клиновидной формы с геометрическими размерами: высота $h = 400$ мм; ширина боковых граней $b = 100$ мм; угол раскрытия граней клина $\alpha = \pm 2^\circ$. При расчетах учитывалось, что в корпус наконечника в трех измерительных уровнях, на расстоянии 100 мм, 200 мм и 300 мм от острия клина, встроены датчики для измерения давления на его боковые грани. Для реализации поставленных задач использовались решения конечно-элементного анализа НДС с помощью специально разработанных программ для ПЭВМ. Последовательно были решены упругая и упругопластическая задачи для условий плоского и пространственного деформирования грунта.

В результате упругого решения для бесконечно широкого клина было установлено, что контактные напряжения в центральной части клина линейно возрастают с увеличением перемещений (рисунок 3). В краевых зонах эта закономерность не прослеживается: в верхней части происходит концентрация напряжений; у острия формируются горизонтальные растягивающие напряжения.

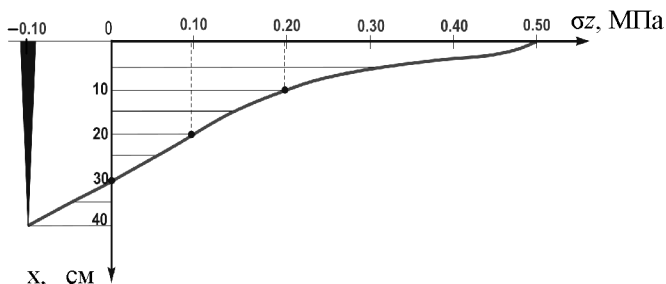


Рисунок 3 – Эталонная эпюра контактных давлений

Решение задачи в упругопластической постановке подтвердило характер распределения контактных давлений по рабочим граням индентора и позволило оценить развитие зон пластического деформирования грунта при погружении индентора (рисунок 4). На малых глубинах, несмотря на смыкание области предельного напряженного состояния, в средней части индентора формируется «упругое» ядро (заштрихованная зона), в котором грунт работает в допредельной стадии. С увеличением глубины размер области предельного состояния уменьшается. Так на глубине 10,0 м пластическое деформирование охватывает лишь нижнюю и верхнюю части индентора.



Рисунок 4 – Влияние глубины погружения индентора на НДС области

Численными расчетами было исследовано влияние величины модуля деформации на эпюру контактных давлений при неизменных параметрах прочности. Результаты расчетов показывают, что между ними наблюдается линейная связь (рисунок 5) в пределах корреляционной зависимости прочности и деформируемости грунта, которая в нашем случае сохраняется до значения модуля деформации $E = 15,0$ МПа для прочности $\varphi = 12^\circ$ и $c = 36$ кПа.

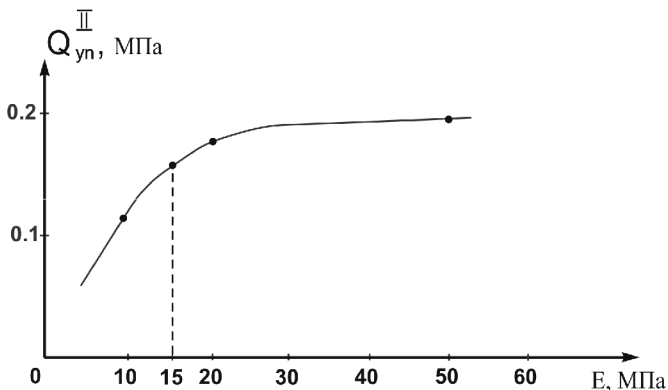


Рисунок 5 – График зависимости показаний среднего датчика давления (Q_{yn}^{II}) от модуля деформации грунта (E)

Расчетами также было установлено, что изменение параметров прочности не оказывает существенного влияния на эпюры контактных давлений в средней части индентора, хотя конфигурации областей пластических деформаций в этих решениях существенно отличаются.

Для оценки распределения боковых давлений по ширине рабочей грани индентора при его погружении было выполнено решение пространственной задачи в упругой постановке (рисунок 6). По результатам выполненных расчетов, путем аппроксимации полученных данных, была определена приближенная зависимость между модулем деформации и средним контактным

давлением для инденторов различной ширины b при постоянной их высоте $h = 400$ мм.

$$E = \frac{\sigma}{K},$$

где: $K = 0,0085 + 0,0068\xi^{-0,76}$, $\xi = \frac{b}{h}$.

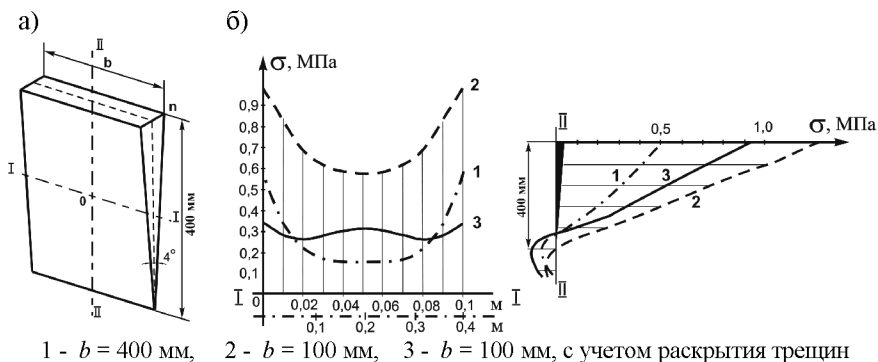


Рисунок 6 – Изменение напряжений для инденторов различной ширины
 а) схема дилатометра б) эпюры напряжений по линиям I-I и II-II

Использование в повседневной работе численных расчетов требует заранее известных физико-механических свойств грунтов, что существенно усложняет их применение. Для оперативности и упрощения интерпретации опытных данных установлена возможность применения формулы Шлейхера. Работа клиновидного индентора вписывается в рамки расчетной модели Шлейхера, при этом датчиком давления фиксируется сосредоточенное контактное давление в средней части плоскости жесткого штампа, а не средняя их величина по всей плоскости рабочей грани. Для устранения этого несоответствия следует модифицировать классическую формулу Шлейхера. Для этих целей используется в качестве расчетной схемы известное решение плоской задачи для абсолютно жесткого штампа, приведенное в работе Н.А. Цытовича «Механика грунтов». В координатной системе XOY (ось Y направлена по продольной оси симметрии индентора) контактные давления в отдельных точках P_x , расположенных вдоль оси X выражаются формулой

$$P_x = \frac{2P_m}{\pi \sqrt{1 - \left(\frac{2x}{b}\right)^2}}, \quad (2)$$

где: P_m – среднее давление по рабочей грани индентора.

Учитывая, что давление в центрально расположенной точке индентора измерится датчиком давления диаметром d , среднее контактное давление q_α по чувствительной мембране датчика с учетом зависимости (2) примет вид

$$q_\alpha = \frac{4P_m}{\pi d} \int_0^{\frac{d}{2}} \frac{dx}{\sqrt{1 - \left(\frac{2x}{b}\right)^2}}$$

Решив выражение (3) относительно P_m с соответствующими преобразованиями и подставив в формулу Шлейхера среднее давление P_m , получим формулу для вычисления модуля деформации (модифицированная формула Шлейхера) в виде

$$E = \frac{\pi(1-\nu^2)\omega d q_\alpha}{2 S_\alpha \arcsin \frac{d}{b}}$$

где: ν – коэффициент Пуассона; ω – коэффициент, учитывающий жесткость и форму рабочих граней индентора; d – ширина (диаметр) чувствительной мембраны датчика давления; q_α – контактное давление по показаниям датчика давления; S_α – перемещение грунта по центру датчика давления; b – ширина рабочей грани индентора.

Обоснованность использования модифицированной формулы оценивалась по величине углового коэффициента для классической и модифицированной (4) формулы Шлейхера относительно эталонного решения, которое было получено численными вычислениями пространственной задачи упругого деформирования (1). Для этого расчетную формулу для определения модуля деформации грунтов представим в виде линейной зависимости

$$E = C_{pq} \cdot q, \quad (5)$$

где: C_{pq} – коэффициент индентора, зависящий от соотношения его геометрических размеров и от величины коэффициента Пуассона.

Оценка коэффициента индентора выполнялась для наконечников с постоянной высотой $h = 400$ мм и заданным перемещением $S = 7$ мм, но с изменяющейся шириной рабочей грани b . Величина коэффициента Пуассона ν принята такая же, как и в численных расчетах ($\nu = 0,30$), размер стороны квадратного датчика давления $d = 32$ мм. Результаты вычислений C_{pq} отобраны на рисунке 7.

По модифицированной формуле Шлейхера (линия 3), которая учитывает размеры датчика давления и седлообразность эпюры контактных давлений, действующих по рабочей грани индентора, результаты вычислений располагаются значительно ближе к значениям, полученным по численному пространственному решению (линия 2), которое используется как эталонное. Однако и модифицированная формула по мере приближения к концам интервала изменения ζ плохо согласуется с эталонными значениями. Чтобы ис-

ключить данное разночтение рекомендуется ограничить интервал изменения параметра ξ в пределах $0,5 \geq \xi \geq 0,2$.

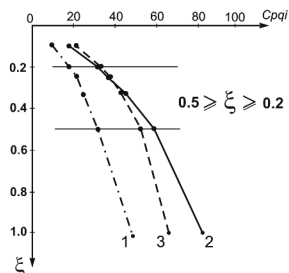


Рисунок 7 – Зависимость коэффициента индентора C_{pqi} от геометрических соотношений индентора ξ

Использование аналитических зависимостей (4) и (5) значительно упрощает процедуру определения модуля деформации по результатам испытаний грунтов dilatометром без привлечения громоздких численных вычислений.

В третьей главе приведены экспериментальные исследования по подтверждению численных расчетов и обоснованию конструктивных параметров клиновидного индентора, а также методических особенностей работы расклинивающего dilatометра.

Исследования проводились в полевых условиях на опытных полигонах и на отдельных производственных участках, где выполнялись инженерно-геологические изыскания, на расстоянии, не превышающем 5 м от технических скважин. Сопоставимые опыты выполнялись в непосредственной близости (не более 2 м) друг от друга. Для проведения экспериментов использовалось однотипное оборудование (установка статического зондирования СП-59А). Вдавливание индентора выполнялось с постоянной скоростью равной 0,2 м/мин, с фиксацией через 20 см «текущих» значений контактных давлений или модуля деформации грунтов. В конце каждого метра погружения осуществлялось наблюдение за изменением (релаксацией) значений контактных давлений или модуля деформации через 2, 4, 6 минут, по результатам которых определялись корректирующие коэффициенты, переводящие «текущие» значения напряжений (модуля деформации) в «стабилизированные». Откорректированные значения использовались в дальнейшем для анализа результатов экспериментов.

Для выполнения экспериментальных исследований было специально изготовлено семь рабочих наконечников различных типоразмеров.

Полигон № 1 расположен в г. Новосибирске в пределах поймы р. Оби. В геологическом строении полигона принимают участие верхнечетвертичные аллювиальные отложения р. Оби (a_{QIV}), представленные песками и супесями. Грунтовые воды залегают на глубине 5,0 м. Исследования проводились в

песках пылеватых неоднородных средней плотности малой степени водонасыщения (далее песок), залегающих с поверхности или сразу под почвенно-растительным слоем. Мощность слоя 4,1 м.

Полигон № 2 находится на станции Мочище Новосибирского района. В геоморфологическом отношении полигон расположен в пределах Приобского плато. В геологическом строении принимают участие верхнечетвертичные эолово-делювиальные отложения краснодубровской свиты (*vd II kd*), представленные суглинками и супесями. Грунтовые воды залегают на глубине 6,5 м. Исследования проводились в суглинках полутвердых (далее суглинок), залегающих с глубины 2,5 м мощностью 3,5 м.

Дополнительно к опытным полигонам, отдельные эксперименты выполнялись на 5 участках проведения производственных инженерно-геологических изысканий, на которых исследовались супеси и суглинки от твердой до текучей консистенции.

Для проверки численных решений выполнены исследования по оценке распределения контактных давлений по рабочим граням индентора при его погружении в грунт. Эксперименты проводились с использованием шестикамерного дилатометра (с тремя камерами с каждой стороны) (рисунок 8).

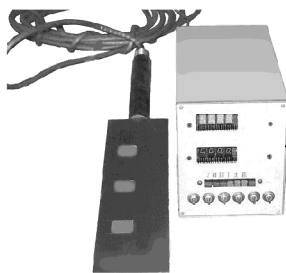


Рисунок 8 – Двухсторонний шестикамерный дилатометр

Для сопоставления опытных данных с теоретическими выполнено решение пространственной задачи в упругопластической постановке для индентора с геометрическими размерами, соответствующими шестикамерному индентору. По данным средних значений контактных напряжений на каждом измерительном уровне, построены эпюры их распределения по высоте индентора, которые совмещены с результатами численных решений (рисунок 9).

Теоретические и опытные данные по обоим полигонам дают хорошее совпадение осредненных значений контактных давлений, особенно по второму измерительному уровню, где опытные данные количественно превышают расчетные значения на 0...16 %.

На основании выполненных исследований определено оптимальное место устройства датчика давления – в средней части индентора, которое не оказывает существенного влияния на точность измерения информации.

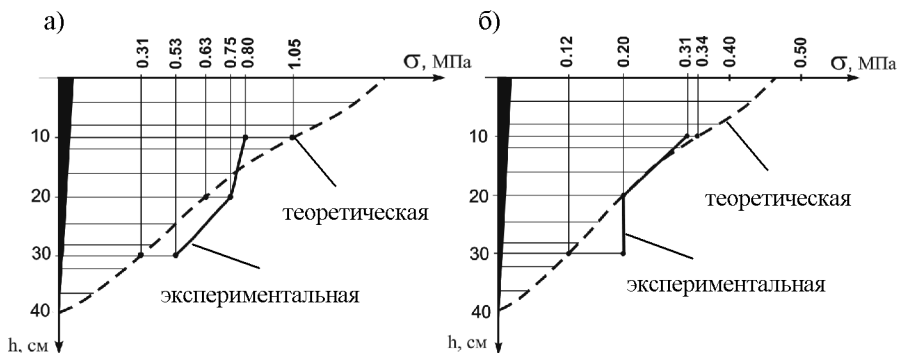


Рисунок 9 – Эпюры контактных давлений по полигону № 1 (а) и № 2 (б)

Клиновидный индентор по мере своего погружения задает горизонтальные перемещения исследуемым грунтам, величина которых зависит от угла раскрытия рабочих граней клина α . Для выбора оптимальной величины перемещения выполнены эксперименты с использованием опытных инденторов с одинаковыми формами и размерами рабочих граней (100x400 мм), но с различными углами их раскрытия, равными $\pm 1^\circ$, $\pm 2^\circ$ и $\pm 3^\circ$ (рисунок 10 а).

Обобщенные графики зависимости контактных давлений от задаваемых перемещений отражают, в основном, линейный характер их изменения (рисунок 10 б).

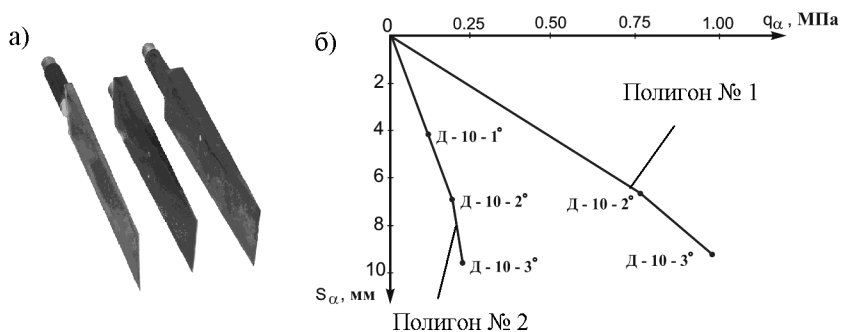


Рисунок 10 – Опытные инденторы с различным раскрытием рабочих граней (а) и изменение контактных давлений от перемещений по полигонам № 1 и № 2 (б)

Предел практически линейной деформируемости грунтов совпадает с показаниями датчика давления дилатометра Д-10-2°, следовательно, значение угла наклона рабочих граней индентора $\alpha = \pm 2^\circ$, а также величину заданного при этом перемещения $S_\alpha = 6,89$ мм следует считать предельными для данного соотношения сторон прямоугольных рабочих граней индентора.

Для исследования влияния формы индентора на величину модуля деформации грунтов были выполнены эксперименты с использованием

опытных инденторов с одинаковыми значениями углов при вершине клина, равные $\alpha = \pm 2^\circ$, но с различными соотношениями сторон рабочих граней (рисунок 11 а). Соотношение высоты h к ширине b рабочих граней изменялось от 1 до 5,71.

По результатам обобщения частных значений модуля деформации установлено (рисунок 11 б), что dilatometer Д-7 по сравнению с dilatometer Д-10 занижает значения модуля деформации ($\delta = 4,5\%$), dilatometer Д-20 по сравнению с dilatometer Д-10 завышает результаты опробования ($\delta = 18,3\%$), что подтвердило необходимость введения ограничения по соотношению сторон индентора. В нашем случае в рекомендуемое соотношение попадает dilatometer Д-10.

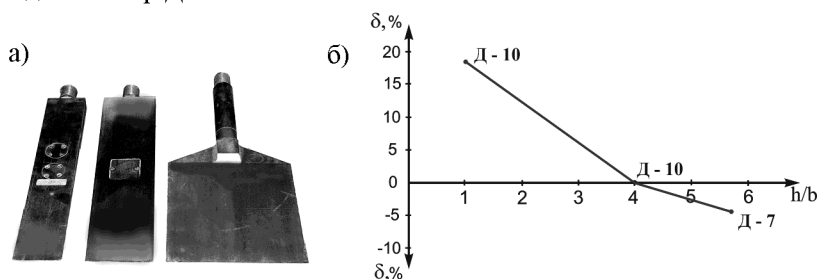


Рисунок 11 – Опытные инденторы с различными размерами рабочих граней (а) и относительное отклонение модуля деформации в зависимости от соотношения сторон индентора (б)

Для определения влияния толщины режущей кромки на величину модуля деформации грунтов были выполнены исследования с помощью индентора, толщина острия которого изменялась от 0,6 до 3,5 мм, путем последовательного его укорачивания со стороны острия клина.

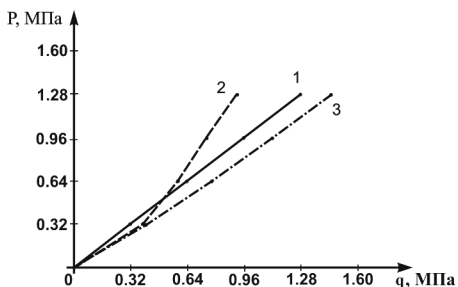
Изменение толщины острия клина почти в 6 раз привело к увеличению «нестабилизованных» и «стабилизированных» значений модуля деформации, которое для исследуемых грунтов составило 8,4% и 16,1% соответственно.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что небольшие изменения исходной толщины острия клина в процессе эксплуатации расклинивающего dilatometer, не будут заметно влиять на величину измеряемого модуля деформации грунтов.

Для исследования влияния жесткости мембраны датчика давления на точность измеряемой информации были изготовлены два опытных индентора с различной толщиной чувствительных мембран $\delta = 1,0$ и $2,0$ мм.

Изначально была проведена калибровка датчиков давления с использованием накладной гидравлической и грунтовой камер (рисунок 12). Накладная гидравлическая камера действует на чувствительную мембрану практически без искажений независимо от жесткости мембраны датчика давления. В грунтовой калибровочной камере действующие нормальные напря-

жения передаются на чувствительный элемент датчика давления с существенными искажениями в зависимости от жесткости чувствительной мембраны.



- 1 - накладная гидравлическая камера ($\delta = 1,0$ и $2,0$ мм);
 2 - грунтовая камера ($\delta = 1,0$ мм);
 3 - грунтовая камера ($\delta = 2,0$ мм).

Рисунок 12 – График зависимости давления q , замеренного датчиком, от давления P , заданного по манометру калибровочного устройства, для чувствительных мембран различной толщины δ

Данные искажения связаны с пассивностью датчика давления, фиксирующего напряжения, созданные внешним источником. При погружении индентора он активно формирует собственное поле напряжений, что принципиально отличается от условий калибровки с использованием грунтовой камеры.

Для подтверждения результатов калибровки выполнены эксперименты в грунтах со сравнительно высокими значениями модуля деформации (супесь твердая с прослоями песка). Результаты полевых исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты полевых исследований датчиков давления с мембранами различной жесткости

Вид калибровки	Кол-во определений	Среднее значение контактного. давл. q , МПа		Δq , МПа	Относительное отклонение, %
		$\delta = 1$ мм	$\delta = 2$ мм		
Накладная камера	30	0,58	0,59	0,01	2,26
Грунтовая камера	30	0,54	0,72	0,18	33,7

Обработка опытных данных с использованием результатов калибровки датчиков накладной гидравлической камерой, показали, что результаты по датчику с толщиной мембраны $\delta = 2,0$ мм практически совпадают с показаниями датчика $\delta = 1,0$ мм. Обработка данных по результатам калибровки дат-

чиков в грунтовой камере, показали, что датчик с мембраной $\delta = 2,0$ мм завышает показания по сравнению с датчиком $\delta = 1,0$ мм на 33,7 %.

Таким образом, измеряемая, встроенным в индентор датчиком давления, информация практически не зависит от жесткости чувствительных мембран в интервале толщин 1,0...2,0 мм. Калибровку датчиков давления дилатометров следует осуществлять с помощью накладных гидравлических камер.

Одним из постоянно действующих и трудно контролируемых факторов, который может повлиять на точность измеряемой информации, является скорость погружения дилатометра в грунт. Чтобы оценить влияние этого параметра на точность получаемой информации были проведены исследования в трех, рядом расположенных точках. Погружение инденторов в грунт осуществлялось в каждой точке с разной скоростью (в точке 1 - $v = 0,09 \dots 0,1$ м/мин, в точке 2 - $v = 0,3 \dots 0,4$ м/мин, в точке 3 скорость погружения была назначена максимально возможная и изменялась от 0,75 до 2,61 м/мин в зависимости от плотности сложения грунтов). Исследования, выполненные с разной скоростью, свидетельствуют о незначительном возрастании средних значений модуля деформации при увеличении скорости погружения индентора в 17 раз. Так значения «нестабилизованного» модуля деформации \tilde{E} , при увеличении минимальной скорости погружения индентора более чем в три раза, возрастает на 2,6%, при возрастании скорости в 17 раз увеличение \tilde{E} составило 5,3%. Для «стабилизированных» значений модуля деформации E получен противоположный результат: при аналогичном увеличении скорости погружения индентора значения E уменьшилось, соответственно, на 1,7 и 5,4%.

Результаты исследований показали, что скорость погружения индентора оказывает незначительное влияние на величину модуля деформации исследуемых грунтов. При малых скоростях погружения индентора (для исследованных грунтов $v < 0,095$ м/мин) значения модуля деформации неустойчивы. Оптимальная скорость погружения индентора, должна составлять 0,3...0,5 м/мин.

В дилатометре для измерения контактных давлений используется мессдоза с податливой чувствительной мембраной, в пределах которой перемещения грунта будут изменяться в соответствии с жесткостью мембраны и действующими на нее контактными давлениями. Критерий стабилизации давления, с учетом скорости изменения прогиба мембраны и скорости перемещения, регламентируемой действующими нормативными документами для полевых исследований сжимаемости грунтов, определен расчетным путем и рекомендуется принять равным 0,1 МПа за интервал времени $\Delta t = 2,0$ мин.

Для установления продолжительности и характера стабилизации напряжений в грунте были выполнены экспериментальные исследования в четырех точках на разных глубинах, где залегают глинистые грунты, обладающие значительной стабилизацией наблюдаемых параметров. По результатам шестичасовых наблюдений за релаксацией напряжений установлено, что

наибольшие изменения текущего значения E_t наблюдаются в начальный отрезок времени $\Delta t \leq 12$ мин., что дает возможность применить теоретический подход к определению «стабилизированных» значений модуля деформации путем математической экстраполяции с помощью затухающей функции. Теоретическая экстраполяция по замерам в первый шестиминутный интервал времени дала достаточно хорошие приближения к экспериментальным точкам. Максимальные отклонения от эксперимента в конце интервала наблюдений не превысили 1,0...4,5%, что позволяет сократить время проведения испытаний до 6 минут, а «стабилизированные» значения модуля деформации рассчитывать с использованием теоретической экстраполяции.

Анализ экспериментальных и расчетных данных показывает что стабилизация текущих значений модуля деформации E_t в приборах релаксационного типа, происходит значительно быстрее, чем в устройствах традиционного типа, работающих в режиме ползучести исследуемого материала. Испытание грунтов дилатометром Д-10 с целью определения модуля деформации следует вести до основной стабилизации E_t , определяемой соотношением $\Delta E_t / \Delta t = 0,1$ МПа за время $\Delta t = 2$ мин.

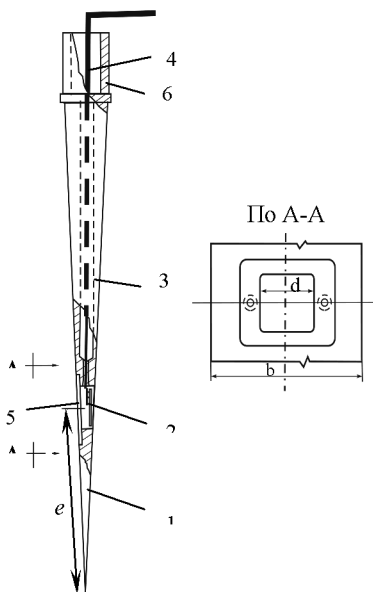


Рисунок 13 – Рабочий наконечник дилатометра

В четвертой главе приводится конструкция расклинивающего дилатометра РД-100, а также методика проведения испытаний и калибровки прибора. Рабочий наконечник дилатометра (рисунок 13) состоит из корпуса 1 клиновидной формы, внутри которого выполнен тензометрический динамометр 2 мембранного типа. Электрический кабель 4 пропущен через внутреннее отверстие 3 корпуса 1 и полые зондировочные штанги, и служит для обеспечения работы тензометрического динамометра в комплекте с регистратором. Внутренняя полость тензометрического динамометра 2 залита герметикой и закрыта крышкой 5. Корпус 1 дилатометра соединяется с колонной зондировочных штанг посредством резьбового соединения 6. Питание прибора РД-100 осуществляется от аккумуляторной батареи базового автомобиля.

При работе с дилатометром не требуется бурения скважин. Погружение РД-100 в грунт на заданную глубину производится статическим вдавливанием с помощью силовой установки с постоянной скоростью 0,3...0,5 м/мин. По мере погружения индентора дилатометра окружающий его грунт

начинает перемещаться преимущественно в горизонтальном направлении. Однонаправленное плавное уплотнение грунта рабочими гранями клина полностью исключает области разгрузки и положительно влияет на точность моделирования процессов деформирования исследуемой толщи. В процессе погружения рабочего наконечника через 20 см по цифровому регистратору фиксируются «текущие» значения модуля деформации грунтов, которые рассчитываются с помощью модифицированной формулы Шлейхера (4). Представление формулы (4) в виде линейной зависимости (5) позволяет путем специальных калибровочных процедур ввести ее в цифровой регистратор и фиксировать сразу значения модуля деформации грунтов. В конце каждого метра погружения осуществляется наблюдение за изменением (релаксацией) значений модуля деформации через 2, 4, 6 минут, по которым, путем математической экстраполяции, вычисляются «стабилизированные» значения и определяются корректирующие коэффициенты, переводящие «текущие» значения модуля деформации в «стабилизированные», которые используются для интерпретации опытных данных. Средние послойные значения корректируются по результатам сопоставительных испытаний грунта штампом площадью 5000 см².

Для обработки результатов испытаний грунтов дилатометром РД-100 разработана программа «ДИЛАТОМЕТР», которая предназначена для расчета модуля деформации, подготовки отчетов и вывода на печать графика изменения модуля деформации по глубине.

В пятой главе приведен сравнительный анализ результатов, исследования грунтов дилатометром РД-100, с традиционными способами определения модуля деформации, которые проводились в два этапа. На первом этапе выполнен точечный статистический анализ частных значений в пределах выделенных ИГЭ на опытных полигонах № 1 и 2, где проведены параллельные исследования сжимаемости грунтов различными методами. В последующем, по мере проведения сопоставительных экспериментов на отдельных производственных площадках, выполнялось накопление сравнительных данных для двумерного статистического анализа.

В ходе экспериментов модуль деформации определялся в лабораторных условиях на компрессионных приборах КПр-1, а также в полевых условиях с помощью штампов $S = 600 \text{ см}^2$, лопастного прессиометра ЛПМ-15 и расклинивающего дилатометра РД-100 без применения каких-либо корректирующих коэффициентов. Результаты исследований грунтов на полигонах показаны на рисунке 14.

Средние значения модуля деформации по полигону № 1 составили: $E_{\text{шт}} = 23,0 \text{ МПа}$, $E_{\text{лмм}} = 18,3 \text{ МПа}$, $E_{\text{рб}} = 24,1 \text{ МПа}$; по полигону № 2 – $E_{\text{шт}} = 8,7 \text{ МПа}$, $E_{\text{лмм}} = 6,2 \text{ МПа}$, $E_{\text{лаб}} = 5,8 \text{ МПа}$, $E_{\text{рб}} = 7,2 \text{ МПа}$.

Для построения уравнений регрессии и выявления связи между результатами дилатометрического и традиционных методов определения модуля деформации грунтов были использовано: испытаний штампом – 161 опр.;

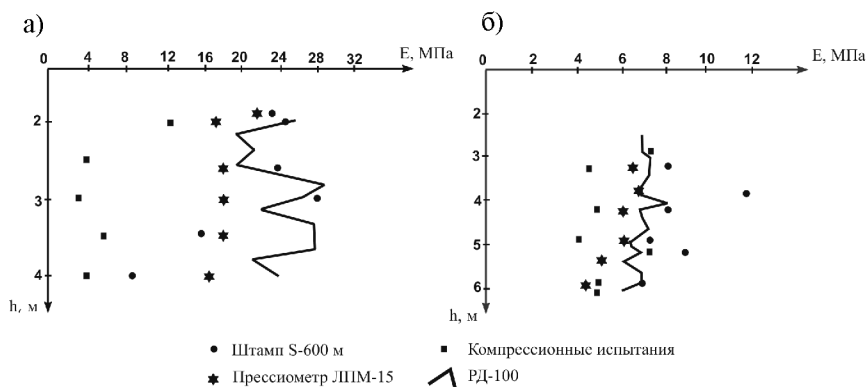


Рисунок 14 – Изменение модуля деформации грунтов по глубине на опытных полигонах № 1 (а) и № 2 (б)

испытаний лопастным прессиометром – 118 опр.; компрессионных испытаний – 200 опр.; испытаний расклинивающим дилатометром – 1834 опр. При сопоставлении результатов исследований каких-либо ограничений в отношении однообразия грунтовых условий не делалось, в сопоставительные выборки вошли даже техногенные грунты, представленные тонкодисперсными золами.

При статистической обработке результатов испытаний составлялись различные уравнения регрессии, но наиболее тесная и оправданная связь установлена в виде линейной регрессии с соответствующими коэффициентами корреляции r (6-8).

$$E_{p\partial} = 0,886 E_{лит} + 1,28 \text{ МПа}, \quad r = 0,95 \quad (6)$$

$$E_{p\partial} = 1,061 E_{лм} - 0,10 \text{ МПа}, \quad r = 0,96 \quad (7)$$

$$E_{p\partial} = 1,011 E_{лаб} + 0,61 \text{ МПа}, \quad r = 0,78 \quad (8)$$

Анализ материалов сопоставления показывает, что между результатами дилатометрических испытаний и применяемым в настоящее время методами исследования грунтов имеется тесная связь.

В шестой главе приведены результаты внедрения расклинивающего дилатометра и методики его применения. Опыт двадцатилетней эксплуатации расклинивающего дилатометра РД-100 позволяет сформулировать следующую производственную характеристику устройства в целом: отсутствие подвижных частей и связанная с этим простота конструкции рабочего органа дилатометра способствует высокой эксплуатационной надежности устройства в самых разнообразных грунтовых условиях; представленных классом дисперсных грунтов. Весь технологический цикл замыкается на одну установку статического зондирования, широко распространенную в практике инженерных изысканий, которая может обеспечить определение более 20 тысяч значений модуля деформации грунтов в год.

Основные выводы

1. Анализ НДС грунта при погружении клиновидного индентора показал, что между средним уровнем контактных давлений и модулем деформации грунтов наблюдается линейная связь, коэффициент пропорциональности которой зависит преимущественно от геометрических соотношений индентора.

2. Выведена формула для вычисления дилатометрического модуля деформации (модифицированная формула Шлейхера).

3. Обоснованы основные конструктивные параметры рабочего наколенника. Линейное деформирование грунта обеспечивает клиновидный индентор с геометрическими размерами: ширина $b = 100$ мм, высота $h = 400$ мм, угол раскрытия рабочих граней $\alpha = \pm 2^\circ$, с двухсторонним расположением по центру рабочих граней датчиков давления. Жесткость мембраны датчика давления, толщиной 1,0-2,0 мм и режущая кромка индентора, толщиной не более 2,0 мм, не вызывают заметных искажений измеряемой информации.

4. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработана методика применения расклинивающего дилатометра.

5. Результаты испытаний дисперсных грунтов на сжимаемость расклинивающим дилатометром и стандартными методами определения модуля деформации грунтов, выявили хорошую сходимость нового метода со стандартными способами, что позволяет рекомендовать релаксационный способ, реализуемый расклинивающим дилатометром, для широкого практического применения.

Список работ автора по теме диссертации:

В изданиях по перечню ВАК:

1. Писаненко В.П., Лавров С.Н. Полевые испытания деформационных свойств грунтов методом контролируемых перемещений // Изв. вузов. Строительство и архитектура / НИСИ им. В.В. Куйбышева. – Новосибирск, 1990. – № 5. – С. 130-133.

2. Лавров С.Н., Нуждин Л.В. Сравнительный анализ результатов исследований дилатометром РД-100 с традиционными способами определения модуля деформации грунтов // Изв. вузов. Строительство / НГАСУ (Сибстрин). – Новосибирск, 2011. – № 7. – С. 107-119.

В других изданиях:

3. Писаненко В.П., Караулов А.М., Лавров С.Н. К вопросу о напряженном состоянии грунтового массива вокруг клиновидного и конического инденторов // Инженерно-геологические условия, основания и фундаменты транспортных сооружений в Сибири: межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск: НИИЖТ, 1991. – С. 35-43.

4. Писаненко В.П., Лавров С.Н. О методике контролируемых перемещений // Архитектура и строительные конструкции: Матер. научно-техн. конф. – Новосибирск: НИСИ, 1991. – С. 82-83.

5. Рекомендации по определению деформационных свойств грунтов расклинивающим дилатометром РД-100 / ПНИИИС (Зиангиров Р.С., Якимов Ю.Ф.), ЗапСибТИСИЗ (Писаненко В.П., Лавров С.Н.). – М.: ПНИИИС, 1991. – 31 с.
6. Лавров С.Н., Писаненко В.П. Влияние толщины острия клиновидного индентора на величину модуля деформации исследуемых грунтов // Архитектура и строительные конструкции: Матер. научно-техн. конф. – Новосибирск: НИСИ, 1992. – С. 66-67.
7. А. с. 1758158 (СССР), МКИ Е 02 D 1/00. Прессиометр / Писаненко В.П., Лавров С.Н. – № 4797867/33; заявл. 01.03.90; опубл. 30.08.92, Бюл. 1992. – № 32
8. Лавров С.Н., Писаненко В.П. Исследования арочного эффекта при испытании грунтов расклинивающим дилатометром // Строительные конструкции и расчет сооружений: Матер. научно-техн. конф. – Новосибирск: НИСИ, – 1993. – Ч. 1. – С. 57-58.
9. Лавров С.Н., Писаненко В.П. Опыт применения расклинивающей дилатометрии исследования деформационных свойств грунтов // Геотехника-99: сб. матер. междунар. научно-практ. конф. – Пенза, 1999. – С. 91-94.
10. Лавров С.Н. Нуждин Л.В., Караулов А.М., Писаненко В.П. Решение пространственной задачи об упругопластическом деформировании грунта при внедрении клиновидного индентора // Будівельні конструкції. Механіка ґрунтів та фундаментобудування: збірник наукових праць. – Київ: НДІБК, 2000. – Вип. 53, кн. 1. – С. 163-168.
11. Лавров С.Н., Нуждин Л.В., Караулов А.М., Писаненко В.П. Упругое решение пространственной задачи о напряженно-деформированном состоянии грунта при внедрении клиновидного дилатометра // Геотехника: наука и практика: сб. науч. тр. – СПб.: СПбГАСУ, 2000. – С. 138-143.
12. Лавров С.М. Нуждин Л.В., Писаненко В.П. Розклинюючий дилатометр для дослідження деформаційних властивостей ґрунтів // Вісник одеської Державної Академії Будівництва та Архітектури. – Одеса: ОДАБА, 2001. – Вип. № 4. – С. 316-319.
13. Лавров С.Н., Писаненко В.П., Нуждин Л.В. Исследование деформационных свойств дисперсных грунтов в полевых условиях // Современные проблемы фундаментостроения: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград: ВолгГАСА, 2001. – Ч. 3. – С. 52-54.
14. Lavrov S.N., Nuzhdin L.V., Pisanenko V.P. Estimation of deformation properties of weak soils in field conditions with the help of a wedge dilatometer (WD-100) // Proc.of the International. conf. on coastal geotechnical engineering in practice. – Atyrau, 2002. – P. 242-244/
15. Лавров С.Н., Писаненко В.П., Нуждин Л.В. Устройство для определения деформационных свойств грунтов в полевых условиях // Проблемы геотехники в современном строительстве и памятников архитектуры: тр. II-го Центрально-Азиатского геотехнического симпозиума. – Самарканд, 2002. – С. 36-38.

16. Лавров С.Н., Писаненко В.П., Нуждин Л.В. Опыт применения метода контролируемых перемещений для полевых исследований грунтов // Тр. Каспийской Междунар. конф. по геоэкологии и геотехнике. – Баку, 2003. – С. 158-167.

17. Лавров С.Н., Нуждин Л.В. Полевые методы исследования модуля деформации грунтов расклинивающим дилатометром // Гуманизм и строительство. Природа, этнос и архитектура: сб. тр. междунар. научно-практич. конф. – Барнаул: АлтГТУ, 2003. – С. 82-83.

18. Lavrov S.N., Nuzhdin L.V., Pisanenko V.P. Application of a method of assigned displacements (MAD) at mechanical testing in situ // Geotechnical problems on construction of large-scale and unique projects: proc. of the International geotechnical conf. – Almaty: KGA, 2004. – P. 312-317.

19. Лавров С.Н., Нуждин Л.В., Писаненко В.П. Исследование характера распределения контактных давлений при погружении расклинивающего дилатометра // Матер. 63-ой науч.-техн. конф. – Новосибирск: НГАСУ, 2006. – С. 126.

20. Лавров С.Н., Нуждин Л.В., Писаненко В.П. Шестикамерный расклинивающий дилатометр для изучения процесса деформирования грунтов // Матер. 63-ой науч.-техн. конф. – Новосибирск: НГАСУ, 2006. – С. 127-128.

21. Лавров С.Н., Нуждин Л.В. Сопоставление результатов определения модуля деформации грунтов различными методами // Матер. 64-ой науч.-техн. конф. – Новосибирск: НГАСУ, 2007. – С. 65.

22. Нуждин Л.В., Лавров С.Н. Оценка надежности получаемых данных при исследовании грунтов расклинивающим дилатометром // Актуальные проблемы строительной отрасли: Матер. II Всерос. конф. – Новосибирск: НГАСУ, 2009. – С. 114.

23. Лавров С.Н., Писаненко В.П., Нуждин Л.В. Использование метода релаксации напряжений при исследовании грунтов // Геотехнические проблемы нового строительства и реконструкции: сб. тр. Всерос. научно-техн. семина. – Новосибирск: НГАСУ, 2011. – С. 214-218.