

**МЕТОД СТАТИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ГРУНТОВ
КЛИНОВИДНЫМ ИНДЕНТОРОМ**

Э.В. КРАВЧЕНКО¹, В.В. ДЕНИСЕНКО¹, И.В. БУДАГОВ¹, П.А. ЛЯШЕНКО²

¹*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2,
электронная почта: denvivi@yandex.ru*

²*Кубанский государственный аграрный университет,
350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, 13,
электронная почта: lyseich1@yandex.ru*

Отмечено, что известные методы статического зондирования грунтов позволяют определять только один параметр (суммарное сопротивление грунта вдавливанию зонда по лобовой поверхности конусного индентора и боковой поверхности зонда) и не позволяют воспринимать и измерять циклическое сопротивление грунтов, которое, как известно, возникает при их нагружении. Разработанный авторами метод основан на использовании эффекта циклического сопротивления грунта вдавливанию клиновидного индентора. Сущность метода заключается в непрерывном с постоянной скоростью вдавливании в грунт клиновидного индентора, закрепленного на штанге и имеющего форму прямой трехугольной призмы и возможность поворота относительно штанги в плоскости, параллельной основаниям его призмы, непрерывной регистрации угла поворота клиновидного индентора относительно штанги и расчете: удельного сопротивления грунта вдавливанию клиновидного индентора, модуля упругости грунта, предельного сопротивления грунта сдвигу, удельной работы трещинообразования грунта и угла направления ослабления прочности грунта.

Ключевые слова: грунты, статическое зондирование, клиновидный индентор, скорость вдавливания, сопротивление грунта вдавливанию индентора.

Одним из перспективных, высокопроизводительных и экономичных методов полевых испытаний грунтов является метод статического зондирования грунтов [1], сущность которого заключается в непрерывном с постоянной скоростью вдавливании в грунт конусного индентора, жестко закрепленного на штанге зонда, непрерывной или через каждые не более чем 0,2 м регистрации силы сопротивления грунта вдавливанию конусного индентора и расчете удельного сопротивления грунта под конусным индентором g_c и общее сопротивление грунта боковой поверхности зонда Q (для зонда типа I) или удельное сопротивление грунта на участке боковой поверхности зонда f (на поверхности муфты трения) (для зонда типа II).

Этот метод в настоящее время широко применяется при производстве инженерно-строительных изысканий, однако он имеет следующие недостатки:

- малоинформативен, т.к. позволяет определять только один параметр (суммарное сопротивление грунта вдавливаю зонда по лобовой поверхности конусного индентора и боковой поверхности зонда);

- не позволяет воспринимать и измерять циклическое сопротивление грунтов, которое, как известно, возникает при их нагружении [2-15];

- не позволяет измерять и учитывать горизонтальную составляющую реакцию грунта, которая возникает на лобовой поверхности конусного индентора, жестко закрепленного на штанге зонда, и которая искажает получаемые характеристики грунта;

- не позволяет определять пространственное ослабление (анизотропию) прочности грунтов в горных массивах;

- позволяет получать на каждой глубине зондирования только одно значение сопротивления грунта вдавливаю зонда и для повышения достоверности и точности результатов требует проведения нескольких испытаний в близлежащих точках испытываемой площадки, что увеличивает трудоемкость и стоимость изысканий.

Нами проведены исследования [2-15], на основании которых разработан новый метод статического зондирования грунтов клиновидным индентором [16], лишенный этих недостатков.

Предлагаемый метод основан на использовании эффекта циклического сопротивления грунта вдавливаю клиновидного индентора. Сущность метода заключается в непрерывном с постоянной скоростью вдавливании в грунт клиновидного индентора, закрепленного на штанге и имеющего форму прямой трехугольной призмы и возможность поворота относительно штанги в плоскости, параллельной основаниям его призмы, непрерывной регистрации угла поворота клиновидного индентора относительно штанги и расчете: удельного сопротивления грунта вдавливаю клиновидного индентора, модуля упругости грунта, предельного сопротивления грунта сдвигу, удельной работы трещинообразования грунта и угла направления ослабления прочности грунта.

Устройство для реализации предлагаемого метода состоит из клиновидного индентора 1, закрепленного на выдвижном сердечнике 2 пустотелой штанги 3, механизма 4 для вдавливания клиновидного индентора, блока 5 непрерывной и регистрации глубины вдавливания клиновидного индентора, блока 6 непрерывной регистрации силы сопротивления грунта вдавливанию клиновидного индентора и блока 7 непрерывной регистрации угла поворота клиновидного индентора относительно штанги (рисунок 1а-б).

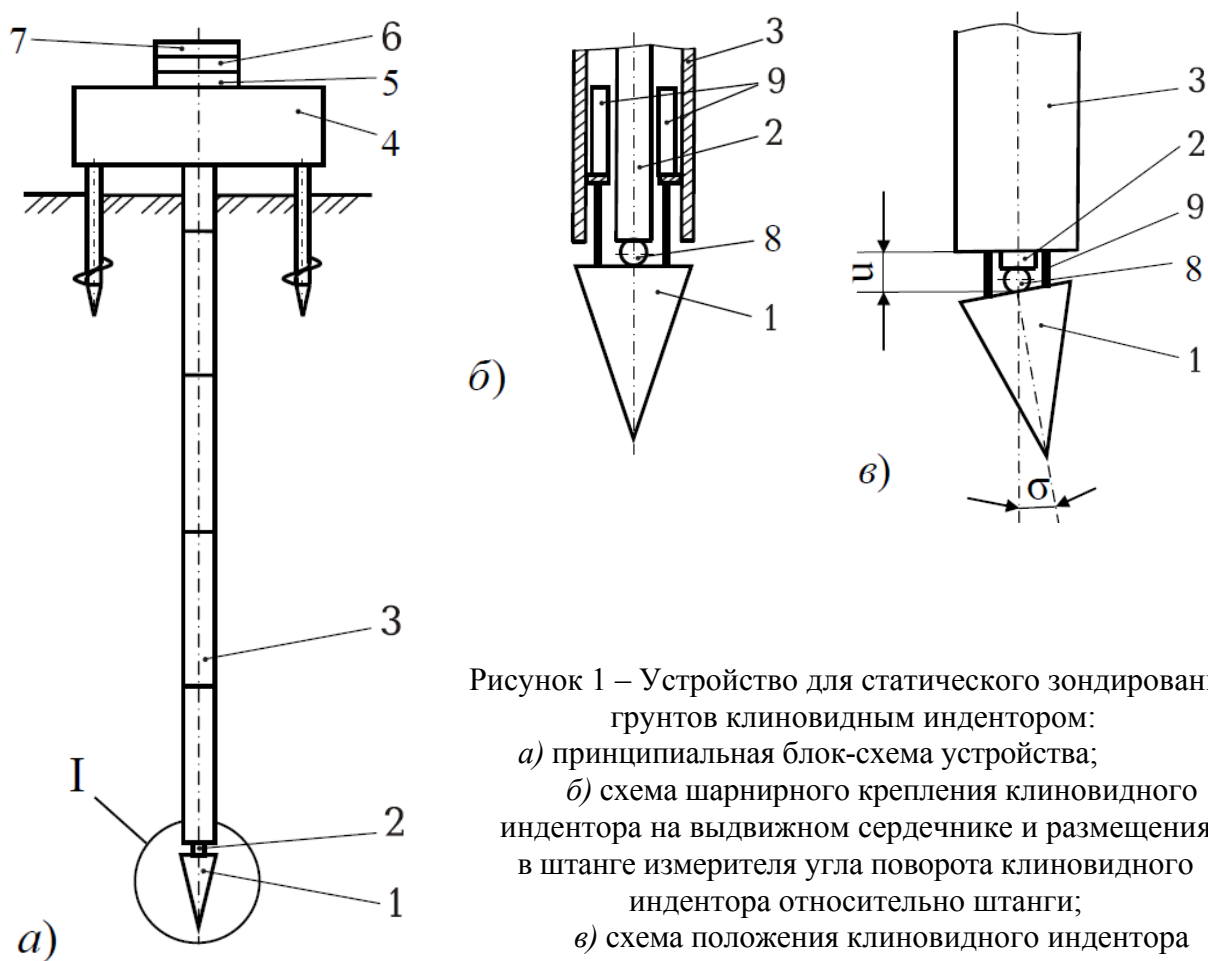


Рисунок 1 – Устройство для статического зондирования грунтов клиновидным индентором:
 а) принципиальная блок-схема устройства;
 б) схема шарнирного крепления клиновидного индентора на выдвижном сердечнике и размещения в штанге измерителя угла поворота клиновидного индентора относительно штанги;
 б') схема положения клиновидного индентора в момент, когда он повернулся относительно штанги в сторону ослабления прочности грунта

Клиновидный индентор 1 имеет форму прямой треугольной призмы и закреплен одной из граней на выдвижном сердечнике 2 штанги 3 с помощью шарнира 8, обеспечивающего поворота призматического клина относительно штанги в плоскости, параллельной основаниям его призмы.

Над гранью призмы, которой клиновидный индентор шарнирно закреплен на выдвижном сердечнике, в штанге установлен измеритель 9 угла поворота клиновидного индентора, выполненный, например, в виде двух датчиков линейного перемещения, размещенных симметрично относительно выдвижного сердечника (рисунок 1б).

Предлагаемый метод осуществляется следующим образом.

На заданной глубине испытания грунта с помощью механизма 4 производят вдавливание клиновидного индентора 1 на всю его высоту с постоянной скоростью до 1,5 м/мин и с предотвращением возможности поворота относительно штанги 3. Для этого вдавливающее усилие прикладывают на штангу, которая при этом смещается относительно сердечника 2, упирается в верхнюю грань клиновидного индентора и вдавливает его в грунт, предотвращая возможность его поворот относительно штанги (рисунок 1б).

Затем производят вдавливание клиновидного индентора ещё на 5-10 мм с постоянной скоростью до 5 мм/мин без предотвращения возможности его поворота относительно штанги с непрерывной регистрацией глубины вдавливания, силы сопротивления грунта и угла поворота клиновидного индентора относительно штанги. Возможность поворота клиновидного индентора относительно штанги обеспечивается путем перевода вдавливающего усилия на сердечник, который при этом выдвигается относительно штанги, создает зазор между верхней гранью клиновидного индентора и торцом штанги и через шарнир 8 передает вдавливающее усилие на клиновидный индентор.

При вдавливании клиновидного индентора с постоянной скоростью без предотвращения возможности его поворота относительно штанги из-за дисперсности и неоднородности грунта, наличия в грунте микро и макропор и появления трещин перед клиновидным индентором:

- сопротивление грунта вдавливанию клиновидного индентора изменяется циклически, то увеличивается до максимального значения (на малом участке перемещения призматического клина Δu_{ei} , сравнимом по размерам с неоднородностью грунта), то уменьшается до минимального значения (также на малом участке перемещения клиновидного индентора Δu_{ti}), затем вновь то

увеличивается, то уменьшается и т.д. (рисунок 2). При этом уменьшение сопротивления грунта объясняется его разрушением сдвигом или трещинами [2-6]. Разрушение сдвигом отражается примерно одинаковыми значениями Δu_{ti} , а разрушение трещинами отражается значениями, которые значительно (на 30 % и более) превышают среднее значение Δu_{ti} ;

- на рабочих гранях клиновидного индентора возникает горизонтальная составляющая реакции грунта, которая поворачивает клиновидный индентор относительно шарнира 8 в плоскости, параллельной основания призмы клиновидного индентора, в сторону ослабления прочности грунта до наступления равенства моментов сил, действующих на рабочих гранях клиновидного индентора (рисунок 1в).



Рисунок 2 – График циклически изменяющегося сопротивления грунта вдавливанию клиновидного индентора

В процессе статического зондирования грунта регистрацию глубины вдавливания клиновидного индентора производят с дискретностью не более 0,02 мм, регистрацию силы вдавливания клиновидного индентора производят с дискретностью не более 2,5 Н, регистрацию угла поворота клиновидного индентора производят с дискретностью не более 0,02° и т.о. на заданной глубине испытания грунта на субмиллиметровом уровне измерений регистрируется большое количество результатов измерений (от 250 до 500), что обеспечивает

повышение точности и достоверности характеристик грунта, получаемых при одном испытании.

По результатам, полученным на заданной глубине испытания, рассчитывают различные физико-механические характеристики грунта с помощью разработанных авторами настоящей статьи расчетных формул, в т.ч. те характеристики, которые известными способа испытаний грунтов не определяются:

- удельное сопротивление грунта вдавливанию клиновидного индентора R , МПа, по формуле

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta Y_{ei} \cdot \cos \delta_i}{(\Delta u_{ei})^2}, \quad (1)$$

- модуль упругости грунта E_e , МПа, по формуле

$$E_e = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\omega \sqrt{\cos \alpha} \cdot (1 - \nu^2) \cdot \Delta Y_{ei} \cdot \cos \delta_i}{\sqrt{2B \cdot h} \cdot \Delta u_{ei}}, \quad (2)$$

- предельное сопротивление грунта сдвигу τ_s , кПа, по формуле

$$\tau_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta Y_{\dot{a}i} \cdot \cos \delta_i \cdot \cos^2 \alpha}{h \cdot B}, \quad (3)$$

- удельную работу трещинообразования грунта σ_γ , Дж/м², по формуле

$$\sigma_\gamma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{2(1 + \nu) \cdot \tau_{si} \cdot Y_{ei} \cdot \cos \delta_i \cdot (\Delta u_{ei})}{E_{ei} \cdot 2B \cdot \Delta u_{ri}}, \quad (4)$$

- угол направления ослабления прочности грунта δ , град., по формуле

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i \cdot \Delta u_{ri}}{\sum_{i=1}^n \Delta u_{ri}}, \quad (5)$$

где ΔY_{ei} – приращение циклически изменяющейся силы сопротивления грунта вдавливаю клиновидного индентора на участке её возрастания в i -ом цикле её изменения, Н;

δ_i – угол поворота клиновидного индентора относительно продольной оси штанги на участке возрастания силы сопротивления грунта вдавливаю клиновидного индентора в i -ом цикле её изменения, град.;

Δu_{ei} – приращение перемещения клиновидного индентора на участке возрастания силы сопротивления грунта вдавливаю клиновидного индентора в i -ом цикле её изменения, мм;

n и i – соответственно число циклов и номер цикла изменения силы сопротивления грунта вдавливаю клиновидного индентора на заданной глубине испытания;

ω – коэффициент, зависящий от отношения длины грани клиновидного индентора к его толщине: $h/(B \cdot \cos \alpha)$;

α – половина угла заострения клиновидного индентора, град.;

ν – коэффициент поперечной деформации грунта (Пуассона);

B – толщина клиновидного индентора, мм;

h – высота клиновидного индентора, мм;

τ_{si} – предельное сопротивление грунта сдвигу на участке возрастания силы сопротивления грунта вдавливаю клиновидного индентора в i -ом цикле её изменения, кПа;

E_{ei} – модуль упругости грунта на участке возрастания силы сопротивления грунта вдавливаю клиновидного индентора в i -ом цикле её изменения, МПа;

Δu_{ri} – приращения перемещения клиновидного индентора на участке снижения силы сопротивления грунта вдавливаю клиновидного индентора в i -ом цикле её изменения, мм.

Аналогичным образом производят испытание и расчет физико-механических характеристик грунта на других глубинах (уровнях залегания грунта) в данной точке зондирования на исследуемой площадке изысканий.

Для определения пространственного ослабления (анизотропии) прочности грунта на данной площадке аналогичным образом производят испытания

грунта в нескольких точках площадки (не менее 6) при различном положении плоскости поворота призматического клина в каждой точке зондирования.

По вычисленным характеристикам грунта на испытываемой площадке (с коэффициентом вариации не более 0,30) для каждой глубины испытания строят лепестковые диаграммы значений угла направления ослабления прочности грунта δ и по наибольшему значению δ_{max} определяют пространственное направление ослабления (анизотропию) прочности грунта в горном массиве.

Таким образом, метод статического зондирования грунтов клиновидным индентором увеличивает число, точность и достоверность определяемых характеристик грунтов при одном испытании и, следовательно, информативность об исследуемых грунтах: показатель структурности, модуль упругости, энергия трещинообразования, предельное сопротивление сдвигу, направление анизотропии прочности, сокращает трудозатраты их определения, позволяет определять пространственное ослабление (анизотропию) прочности грунтов в горных массивах, и таким образом создает практический и экономический эффект.

Метод статического зондирования грунтов клиновидным индентором может применяться как для полевых, так и для лабораторных испытаний грунтов. При реализации метода для полевых испытаний грунтов могут быть использованы любые установки статического зондирования грунтов, для лабораторных испытаний – любые срезные приборы с заданной скоростью сдвига [17].

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 19912-2001 Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием.

2. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Ускоренное определение сжимаемости грунтов методом ПВН // Проектирование и инженерные изыскания. – 1994, № 1. – С. 7-9.

3. Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Новые результаты компрессионных испытаний // Проект. – М., 1995, № 2-3. – С. 76-77.

4. Кравченко Э.В., Ляшенко П.А., Денисенко В.В. О методах испытания грунтов с постоянной скоростью нагружения // Труды международного форума по

проблемам науки, техники и образования. Том 3. – М.: Академия наук о Земле, 2002. – С.133-135.

5. Ляшенко П.А. Микроструктурная деформируемость глинистых грунтов. – Краснодар: КубГАУ, 2001. – 123 с.

6. Кравченко Э.В., Будагов И.В. Обоснование лабораторной модели пенетрационных испытаний почв и грунтов // В книге: Актуальные проблемы современной науки. –2001. – С. 186.

7. Кравченко Э.В. Применение статического зондирования к изучению механических свойств грунтов // В сборнике: Проблемы строительства, инженерного обеспечения и экология городов. Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции. – 2002. – С. 226-228.

8. Кравченко Э.В. Сопротивление структуры глинистого грунта внедрению жесткого зонда // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2002, № 9. – С. 81.

9. Ляшенко П.А., Кравченко Э.В. Внедрение клиновидного зонда в глинистый грунт // В сборнике: Труды международного форума по проблемам науки, техники и образования. III тысячелетие – новый мир. Академия наук о Земле. – 2001. – С. 152-153.

10. Кравченко Э.В., Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Метод пенетрации грунта с постоянной скоростью нагружения клиновидного наконечника // Труды КубГТУ: Научный журнал. Том XX. Серия: Автомобильно-дорожные и кадастровые проблемы. Выпуск 1. – Краснодар: КубГТУ, 2005. – С.162-166.

11. Кравченко Э.В., Денисенко В.В., Ляшенко П.А. Способы и средства оперативного контроля за состоянием нарушенных земель // Сборник материалов VII Международной научно-практической конференции: «Города России: проблемы строительства, инженерного обеспечения, благоустройства и экологии». – Пенза: Пензенская государственная сельскохозяйственная академия, 2005. – С. 118-120.

12. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Вычисление характеристик микроструктуры грунта в опыте с компрессионным сжатием образца // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского

государственного аграрного университета, 2009, № 45 (01). – С. 66-82. – <http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/03.pdf>.

13. Ляшенко П.А., Денисенко В.В. Контактное взаимодействие элементов микроструктуры глинистого грунта // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета, 2012, № 78 (04). – С. 291-318. – <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/25.pdf>.

14. Кравченко Э.В. Определение физико-механических свойств почв и грунтов методом зондирования клиновидным индентером при охране земель // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кубанский государственный аграрный университет. – Краснодар, 2005. – 190 с.

15. Ляшенко П.А. Сопротивление и деформации глинистого грунта. – Краснодар: КубГАУ, 2014. – 163 с.

16. Патент на изобретение РФ № 2280852 G01N 3/42. Способ испытания грунтов / Ляшенко П.А., Денисенко В.В., Кравченко Э.В. // Изобретения. Полезные модели. – М., 2006, № 21.

17. Денисенко В.В., Скрипаль С.М., Плахтеев Г.В., Байков О.Н., Горячев М.И., Дорошенко Г.И., Ляшенко П.А. Автоматизация срезного прибора ПСГ-3А // Отчет о НИОКР теме № 76/86 Госстроя РСФСР. – Краснодар: СевКавТИСИЗ, 1986. – 432 с.

REFERENCES

1. GOST 19912-2001 Grunty. Metody polevykh ispytaniy staticheskim i dinamicheskim zondirovaniem.

2. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Uskorennoe opredelenie szhimaemosti gruntov metodom PVN // Proektirovanie i inzhenernye izyskaniya.-1994, № 1.-S. 7-9

3. Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Novye rezultaty kompressionnykh ispytaniy // Proekt. – М., 1995, № 2-3. – S. 76-77.

4. Kravchenko E.V., Lyashenko P.A., Denisenko V.V. O metodakh ispytaniya gruntov s postoyannoy skorostyu nagruzheniya // Trudy mezhdunarodnogo foruma po problemam nauki, tekhniki i obrazovaniya. Tom 3. – М.: Akademiya nauk o Zemle, 2002. – S.133-135.

5. Lyashenko P.A. Mikrostrukturnaya deformiruemost glinistykh gruntov. – Krasnodar: KubGAU, 2001. – 123 s.

6. Kravchenko E.V., Budagov I.V. Obosnovanie laboratornoy modeli penetratsionnykh ispytaniy pochv i gruntov // V knige: Aktualnye problemy sovremennoy nauki. –2001. – S. 186.

7. Kravchenko E.V. Primenenie staticheskogo zondirovaniya k izucheniyu mekhanicheskikh svoystv gruntov // V sbornike: Problemy stroitelstva, inzhenernogo obespecheniya i ekologiya gorodov. Cbornik materialov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – 2002. – S. 226-228.

8. Kravchenko E.V. Soprotivlenie struktury glinistogo grunta vnedreniyu zhestkogo zonda // Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tehnicheskii zhurnal). – 2002, № 9. – S. 81.

9. Lyashenko P.A., Kravchenko E.V. Vnedrenie klinovidnogo zonda v glinisty grunt // V sbornike: Trudy mezhdunarodnogo foruma po problemam nauki, tekhniki i obrazovaniya. III tysyacheletie – novyy mir. Akademiya nauk o Zemle. – 2001. – S. 152-153.

10. Kravchenko E.V., Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Metod penetratsii grunta s postoyannoy skorostyu nagruzheniya klinovidnogo nakonechnika // Trudy KubGTU: Nauchnyy zhurnal. Tom XX. Seriya: Avtomobilno-dorozhnye i kadastravye problemy. Vypusk 1. – Krasnodar: KubGTU, 2005. – S.162-166.

11. Kravchenko E.V., Denisenko V.V., Lyashenko P.A. Sposoby i sredstva operativnogo kontrolya za sostoyaniem narushennykh zemel // Sbornik

materialov VII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: «Goroda Rossii: problemy stroitelstva, inzhenernogo obespecheniya, blagoustroystva i ekologiii». – Penza: Penzenskaya gosudarstvennaya selskokhozyaystvennaya akademiya, 2005. – S. 118-120.

12. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Vychislenie kharakteristik mikrostruktury grunta v opyte s kompressionnym szhatiem obraztsa // Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2009, № 45 (01). – S. 66-82. – <http://ej.kubagro.ru/2009/01/pdf/03.pdf>.

13. Lyashenko P.A., Denisenko V.V. Kontaktnoe vzaimodeystvie elementov mikrostruktury glinistogo grunta // Politematicheskii setevoy elektronnyy nauchnyy

zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta, 2012, № 78 (04). – S. 291-318. – <http://ej.kubagro.ru/2012/04/pdf/25.pdf>.

14. Kravchenko E.V. Opredelenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv pochv i gruntov metodom zondirovaniya klinovidnym indenterom pri okhrane zemel // Dissertatsiya na soiskanie uchenoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk / Kubanskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet. – Krasnodar, 2005. – 190 s.

15. Lyashenko P.A. Soprotivlenie i deformatsii glinistogo grunta. – Krasnodar: KubGAU, 2014. – 163 s.

16. Patent na izobrenenie RF № 2280852 G01N 3/42. Sposob ispytaniya gruntov / Lyashenko P.A., Denisenko V.V., Kravchenko E.V. // Izobreneniya. Poleznye modeli. – M., 2006, № 21.

17. Denisenko V.V., Skripal S.M., Plakhteev G.V., Baykov O.N., Goryachev M.I., Doroshenko G.I., Lyashenko P.A. Avtomatizatsiya sreznogo pribora PSG-3A // Otchet o NIOKR teme № 76/86 Gosstroya RSFSR. – Krasnodar: SevKavTISIZ, 1986. – 432 s.

METHOD STATIC GROUND SOUNDING WEDGE-SHAPED INDENTER

E.V. KRAVCHENKO¹, V.V. DENISENKO¹, I.V. BUDAGOV¹, P.A. LYASHENKO²

*1Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072,
e-mail: denvivi@yandex.ru*

*2Kuban State Agrarian University,
13, Kalinina, st., Krasnodar, Russian Federation, 350044,
e-mail: lyseich1@yandex.ru*

It is noted that the known methods of static sensing soils allow to define only one parameter (total indentation resistance ground probe on the front surface side and the conical indenter probe surface) and do not allow the cyclic sensing and measuring the resistance of soil that is known to occur when loaded. Designed by the authors of the method is based on the effect of the cyclic resistance of soil wedge indentation of the indenter. The method is continuous at a constant speed pressed into the soil wedge indenter mounted on the rod and having a shape of a straight line with triangular prisms and rotatable relative to the rod in a plane parallel to the bases of its prism, the continuous recording angle wedge indenter relative to the rod and calculating: soil resistivity wedge indentation indenter modulus of elasticity of soil, limit soil shear strength, compressive soil cracking and the angle direction of weakening the strength of the soil.

Key words: soils, static sounding, wedge-shaped indentation, pressing speed, soil resistance indentation.