

Заглавный рисунок: [geoinfo.ru/product/boldyrev-gennadij-grigorevich/k-voprosu-ispolzovaniya-informacionnyh-sistem-pri-izyskaniyah-i-proektirovanii-osnovanij-fundamentov-zdanij-i-sooruzhenij-42530.shtml](http://geoinfo.ru/product/boldyrev-gennadij-grigorevich/k-voprosu-ispolzovaniya-informacionnyh-sistem-pri-izyskaniyah-i-proektirovanii-osnovanij-fundamentov-zdanij-i-sooruzhenij-42530.shtml)

## Об оценке надежности характеристик грунтов, определяемых с помощью статического зондирования

**БОЛДЫРЕВ ГЕННАДИЙ ГРИГОРЬЕВИЧ**

Директор по научной работе и инновациям ООО НПП «Геотек», г. Пенза, Россия

[g-boldyrev@geotek.ru](mailto:g-boldyrev@geotek.ru)

**ООО НПП «ГЕОТЕК» | ПРОИЗВОДСТВО АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ПРИБОРОВ И КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ДИСПЕРСНЫХ И СКАЛЬНЫХ ГРУНТОВ С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ**

Генеральный спонсор «ГеоИнфо»

[info@npp-geotek.ru](mailto:info@npp-geotek.ru)

Представляем вниманию читателей выборочный обзор материалов статьи «Анализ надежности измерений методом СРТ для расчета прочности на сдвиг в недренированных условиях» [2], опубликованной в 2011 году в журнале по геотехническим испытаниям *Geotechnical Testing Journal*, а также на сайте ResearchGate, представляющем собой европейскую академическую социальную сеть, направленную на продвижение результатов научных исследований. Авторы указанной работы – специалисты из США Халид Альшибли (Университет штата Луизиана), Айман Окейл (Университет Теннесси), Башар Альрамахи (компания ExxonMobil) и Чжунцзе Чжан (Департамент качества окружающей среды Луизианы).

Испытания методом статического зондирования (СРТ) широко используются для классификации грунтов и измерения сопротивления грунта сдвигу в недренированных

условиях  $S_u$ . В то же время недренированная прочность  $S_u$  оценивается по данным испытаний методом вращательного среза (лопастного среза, крыльчаткой) – VST. В этом обзоре сравниваются значения  $S_u$ , полученные с использованием методов СРТ и VST. При калибровке формулы для величин  $S_u$ , получаемых с помощью СРТ, использовался метод надежности первого порядка с учетом всех источников неопределенности. Были рассчитаны оптимальные (для различных целей) значения коэффициента статического зондирования  $N_{kt}$ , необходимого для вычисления  $S_u$ . Было определено, что классификация грунтов является единственным аспектом, который четко влияет на оценки недренированной прочности по результатам СРТ. На основе двух разных классификаций были определены значения  $N_{kt}$  для каждого типа грунта для трех целевых уровней надежности. Это показало, что коэффициент  $N_{kt}$  для грунтов с более высоким содержанием глины ниже, чем для грунтов с меньшим ее содержанием.

## Введение

Свою статью [2] Халид Альшибли с соавторами начинают с напоминания о том, что прочность грунтов на сдвиг является ключевым параметром для решения многих геотехнических задач. Стандартные методы ее определения можно разделить на лабораторные испытания (на трехосное сжатие, одноосное сжатие, одноплоскостной срез и пр.) и полевые испытания (динамические пенетрационные конусным зондом (DCPT), на лопастной срез (VST), плоским штампом (PLT), статические на внедрение конуса (СРТ), динамические стандартные пенетрационные (SPT) и др.).

Полевые методы по сравнению с лабораторными, как правило, обеспечивают быстрые и надежные определения сдвиговой прочности. Однако все они, за исключением VST, являются косвенными и основаны на эмпирической оценке результатов измерений.

За последние годы перед выходом статьи [2] для определения характеристик грунтов в полевых условиях приобрел популярность метод СРТ как быстрый, недорогой и довольно точный. Это объясняется его способностью проводить измерения почти непрерывно с гораздо более высоким разрешением результатов, чем стандартные лабораторные испытания образцов грунта. Данные, полученные с помощью СРТ, могут быть использованы для классификации грунтов, позволяют определять их прочность на сдвиг, оценивать их сжимаемость, проницаемость и другие свойства.

## Об определении недренированной сдвиговой прочности грунтов методом СРТ

Как указывают Альшибли и др. [2], поскольку статическое зондирование является косвенным методом, при определении с его помощью свойств грунтов используются эмпирические корреляции между измеряемыми параметрами (лобовым сопротивлением, силами трения, поровым давлением, скоростью поперечных волн, боковыми напряжениями, температурой в зависимости от типа используемого зонда) и результатами лабораторных испытаний на прочность и сжимаемость (на одноплоскостной срез, компрессионных, на трехосное сжатие).

Многие исследователи, на которых ссылаются Альшибли с соавторами [2], пытались разработать надежные корреляции между прочностью связных грунтов на сдвиг и параметрами, полученными с помощью испытаний зондированием. Некоторые из корреляций были основаны на теоретических решениях (с использованием теории пластичности, метода расширения полости, метода траектории деформации, численных методов с применением линейных и нелинейных моделей грунта). Другие разрабатывались эмпирически – путем сравнения данных СРТ и результатов лабораторных испытаний. Например, недренированная прочность на сдвиг  $S_u$  выражается следующим образом:

$$S_u = \frac{q_c - \sigma}{N_c}, \quad (1)$$

где  $q_c$  – измеренное сопротивление грунта под конусом (лобовое);  $N_c$  – теоретический показатель;  $\sigma$  – напряжение от собственного веса грунта (в зависимости от используемой теории для вычисления  $N_c$ , параметр  $\sigma$  может быть вертикальным напряжением  $\sigma_{vo}$ , горизонтальным напряжением  $\sigma_{ho}$  или представлять собой среднее значение  $\sigma_{mean}$ ).

Лунн (Lunne) с соавторами (1997), на которых ссылаются Альшибли и др. [2], предложили для оценки недренированной прочности такую зависимость:

$$S_u = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{N_k}, \quad (2)$$

где  $N_k$  – показатель, который учитывает влияние формы конуса и глубину (например, типичные значения  $N_k$  для нормально уплотненных глин находятся в диапазоне от 11 до 19).

Позднее формула (2) была модифицирована и получила следующий вид:

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{N_{kt}}, \quad (3)$$

где  $q_t$  – скорректированное лобовое сопротивление;  $N_{kt}$  – показатель, значение которого зависит от типа конуса, полевых условий, скорости пенетрации в полевых условиях и от лабораторного метода испытаний (по данным большинства доступных источников, величина  $N_{kt}$  изменяется от 10 до 30).

### О сборе данных СРТ и их обработке

Альшибли с коллегами [2] подчеркивают, что при выборе мест проведения испытаний методом СРТ и скважин для отбора образцов грунта с целью проведения их лабораторных исследований очень важно установить приемлемые критерии для того, чтобы считать одинаковыми свойства грунтов в точках применения этих двух методов (по крайней мере на момент публикации статьи [2] не существовало опубликованных инструкций, устанавливающих пределы расстояний между этими точками). Расстояние между местами выполнения статического зондирования и скважинами составляло, по данным из доступных источников (архивных проектно-исследовательских материалов, баз данных, публикаций и пр.), от 0,3 до 562 м. Иногда рядом с точками СРТ располагалось более одной скважины, и тогда требовалась весовая функция. В том числе для учета близости мест расположения скважин и точек СРТ предлагалось использовать весовую функцию  $1/D$ . Средневзвешенное лобовое сопротивление  $q$  при количестве скважин  $n$ , расположенных на расстояниях  $D_1, D_2, \dots, D_i, \dots, D_n$  от мест статического зондирования, может быть выражено следующим образом:

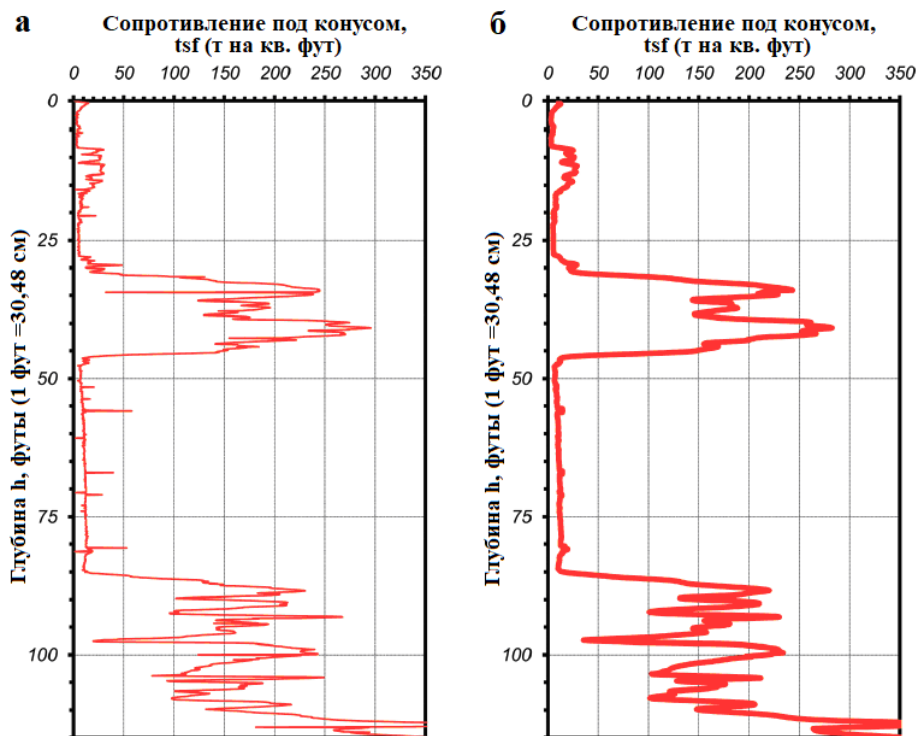
$$q = \sum_{i=1}^n \left[ q_i \left( \frac{\sum_{j=1}^n D_j - D_i}{\sum_{j=1}^n D_j} \right) \right]. \quad (4)$$

Для иллюстрации Альшибли с соавторами [2] рассматривают сценарий для двух скважин на расстояниях  $D_1 = 10,6$  м и  $D_2 = 33,5$  м от точек СРТ. В этом случае получится следующее средневзвешенное значение лобового сопротивления:

$$q = 0,7586q_1 + 0,2414q_2. \quad (5)$$

Альшибли и др. [2] напоминают, что измеренные параметры статического зондирования «скачут» из-за многих факторов. Одним из таких факторов является, например, то, что показания СРТ снимаются почти непрерывно, то есть с очень малыми интервалами по глубине (часто менее 20 мм). Поэтому анализ, основанный на точно измеренных таким путем данных, может привести к ненужному разбросу. В результате выполняется усреднение данных статического зондирования по глубине (как это, собственно, происходит и при лабораторных испытаниях образцов ощутимых размеров). Обычно усреднение выполняется по интервалам глубины 200 мм.

На рисунках 1, а и б показаны представленные авторами статьи [2] исходные данные СРТ и те же результаты после усреднения по интервалам 200 мм соответственно. Видно, что после усреднения локальные «всплески» практически устраняются без потери общей тенденции.



**Рис. 1.** Пример, показывающий результат усреднения данных СРТ: а – лобовое сопротивление при измерениях через каждые 20 мм; б – те же данные после усреднения по интервалам в 200 мм (по [2])

Альшибли с соавторами [2] напоминают, что природные грунты имеют ярко выраженную изменчивость свойств. При этом величины их показателей находятся в ограниченном диапазоне, хотя он и может быть достаточно широким. Значения параметров за пределами этого диапазона могут быть исключены из анализа. Например, чрезвычайно низкие результаты по недренированной прочности на сдвиг  $S_u$  указывают на очень слабые связные (как правило, органоминеральные) грунты, но эти данные трудно проверить в обычной лаборатории и они во многих случаях не отражают реальных грунтовых условий. А высокие значения  $S_u$  обычно

приписываются очень жестким глинам, для которых колебания показаний по лобовому сопротивлению могут быть чрезмерными, что приводит к ненадежным оценкам по данным СРТ. Поэтому для выполнения последующих анализов авторы статьи [2] решили установить ограничения для диапазона значений  $S_u$  и исключили из собранной ими по доступным источникам базы данных величины, превышающие порог в 119,7 кПа и опускающиеся ниже 7,18 кПа.

### Об оценке неопределенности свойств грунтов

Альшибли с коллегами [2] рассказывают, что существует два основных подхода к оценке неопределенностей в свойствах грунтов.

1. При первом подходе неопределенности разделяются на их основные источники, каждый из которых исследуется методически рациональным способом. Основными источниками неопределенностей для решения геотехнических задач являются: природная изменчивость грунтов; ошибки измерений; неопределенность, присущая используемым формулам (моделям преобразований). На рисунке 2, представленном авторами статьи [2], показана схема этих источников. Некоторые специалисты, на которых ссылаются Альшибли и др. [2], использовали этот подход для своих геотехнических проектов.

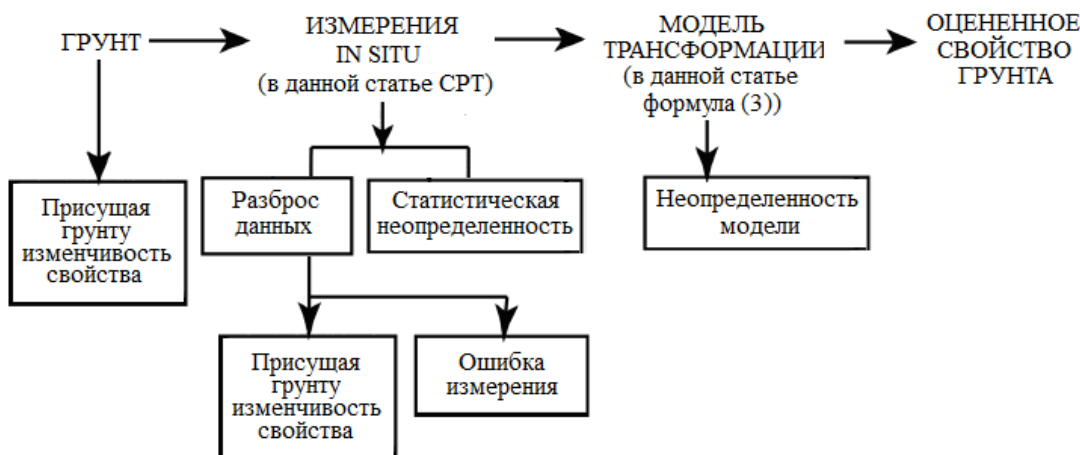


Рис. 2. Источники неопределенностей при оценке свойств грунтов (по [2], Kulhawy, 1992)

2. При втором подходе, наоборот, исследования надежности геотехнических проектов проводятся путем оценки поведения зданий и сооружений, а не на уровне свойств грунта. В этом случае поведение строительных объектов изучается путем сравнения результатов аналитических решений (по осадке, крену) при различной степени изменчивости характеристик грунтовых оснований. Этот подход помогает при проведении инженерно-геологических изысканий в преодолении сложности и нехватки информации из-за малой изученности свойств грунтов.

Одним из выявленных источников неопределенностей, как указывают авторы статьи [2], ссылаясь на других авторов, являются погрешности, присущие измерительному оборудованию. Это должно учитываться при анализе надежности, составляющем основу для корреляции результатов измерений методом СРТ. Альшибли и др. [3] ранее исследовали изменчивость этих результатов путем проведения 16 испытаний в непосредственной близости друг к другу до глубины 24,4 м. Они провели анализ надежности для определения коэффициента вариации COV лобового сопротивления, а также удельного веса грунта  $\gamma$  и напряжения от собственного веса грунта  $\sigma_{vo}$ . Было показано, что  $COV(q_c)$  выше по сравнению с  $COV(\gamma)$  и  $COV(\sigma_{vo})$  (иногда на величину до 40%). В среднем  $COV(q_c)$ ,  $COV(\gamma)$  и  $COV(\sigma_{vo})$  составляют 19,6; 1,46 и 0,51%

соответственно. Эти параметры были включены авторами работы [2] в описываемый далее анализ надежности результатов СРТ.

### Об анализе надежности СРТ

По идее, как отмечают Альшибли с коллегами [2], оценки прочности на сдвиг  $S_u$ , полученные при лабораторных испытаниях образцов из скважин на одноосное сжатие в недренированных условиях (обозначенные на рисунке 3 индексом UC) и на основе полевого статического зондирования (обозначенные на рисунке 3 индексом СРТ), должны быть одинаковыми. Но в реальности неизбежна разница  $Z$  между этими случайными величинами. Если оценки UC больше оценок СРТ, то это приемлемо (см. рис. 3, а). Если же наоборот, то неприемлемо. Это относится и к средним значениям этих оценок (если соблюдается зависимость (3), то разница будет приемлемой), которые обозначены на рисунке 3 греческой буквой  $\mu$  с соответствующими индексами.

Но то же самое можно представить и с помощью функции предельного состояния (LSF), которая является границей между приемлемыми и неприемлемыми результатами, представляя собой разницу  $Z$  и также являясь случайной величиной (рис. 3, б). Она позволяет выполнить анализ надежности данных СРТ. Закрашенная область на рисунке 3, б соответствует вероятности того, что результаты UC будут больше таковых для СРТ. Чем больше эта область, тем надежнее оценки СРТ (в каждом конкретном примере).

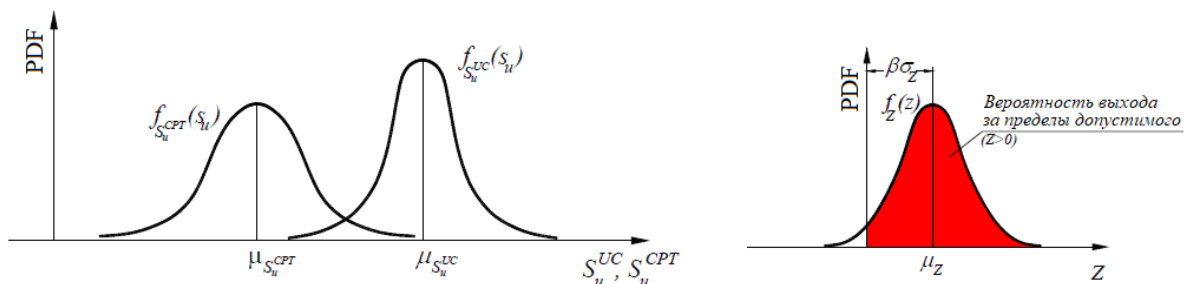


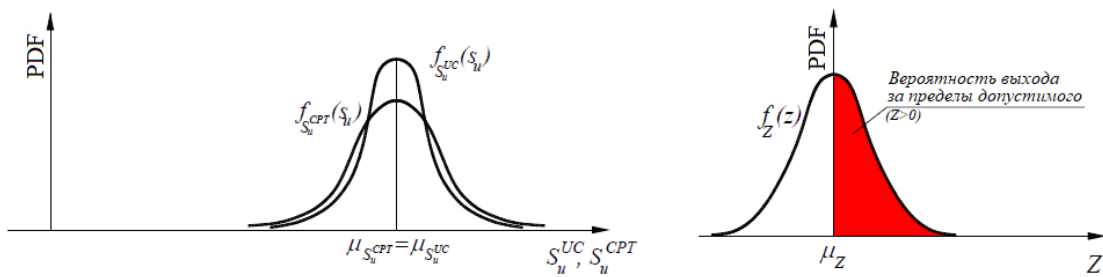
Рис. 3.

Иллюстрация для функции предельного состояния для общего случая (PDF – функция плотности вероятности, или плотность распределения вероятности). Пояснения приведены в тексте (по [1–3])

Косвенной мерой вышеуказанной закрашенной площади является расстояние от среднего значения  $\mu_z$  до начала координат, которое может быть представлено как кратность стандартного отклонения  $\sigma_z$ . Этот множитель определяется как индекс надежности  $\beta$ . Чем он выше, тем выше вероятность  $P_e$  для превышения значений СРТ по сравнению с UC).

В частном случае, когда калибровка модели преобразования (например, формулы (3)) приводит к равным средним значениям прочности на сдвиг для двух методов (рис. 4, а), вероятность превышения  $P_e$  будет равна 50% (рис. 4, б). Следовательно, соответствующий индекс надежности  $\beta$  будет равен нулю, что будет одним из целевых уровней надежности в данном примере [1–3].





**Рис. 4.** Иллюстрация для функции предельного состояния для частного случая, когда калибровка модели преобразования приводит к равным средним значениям прочности на сдвиг для двух методов (PDF – функция плотности вероятности, или плотность распределения вероятности). Пояснения приведены в тексте (по [1–3])

Оценка надежности, проведенная в исследовании [2], была основана на функции предельного состояния, описанной выше. Но оценка прочности на сдвиг по данным CPT ( $S_u^{CPT}$ ) была заменена моделью преобразования (3), используемой для получения значений  $S_u^{CPT}$ . Это позволило учесть неопределенности, присущие исходным показаниям CPT, а именно параметрам  $q_c$  и  $\sigma_{vo}$ .

Следующие уравнения, приведенные авторами статьи [2], показывают детали для функции предельного состояния  $Z$ :

$$Z = S_u^{UC} - S_u^{CPT}; \quad (6a)$$

$$Z = \gamma S_u^{UC} - \xi \left[ \frac{\eta q_c - \sigma_{vo}}{N_{kt}} \right]. \quad (6б)$$

Уравнение 6, б является расширенной версией, в которой  $S_u^{UC}$  заменяется на  $\gamma S_u^{CU}$ , где  $\gamma$  – случайная величина, учитывающая неопределенность, присущую свойствам грунта, а значение  $S_u^{UC}$  принимается за детерминированное, представляющее рассматриваемый грунт. Случайные величины  $\xi$  и  $\eta$  отражают неопределенности в модели преобразования и измеренном лобовом сопротивлении соответственно.

В исследовании [2] для соотношения между оценками прочности на сдвиг по данным CPT и по результатам лабораторных испытаний рассчитывались систематическая ошибка (смещение  $\lambda_\xi$ ) и коэффициент вариации  $COV(\xi)$  с помощью среднего значения и стандартного отклонения:

$$\lambda_\xi = \text{среднее} \left( \frac{S_u^{CPT}}{S_u^{UC}} \right); \quad (7)$$

$$COV(\xi) = \frac{\text{станд. отклонение} \left( \frac{S_u^{CPT}}{S_u^{UC}} \right)}{\text{среднее} \left( \frac{S_u^{CPT}}{S_u^{UC}} \right)} = \frac{\sigma_\xi}{\lambda_\xi}. \quad (8)$$

Для последующего исследования надежности в дополнение к статистическим дескрипторам  $\lambda$  и  $COV$  требовалось определить тип статистического распределения.

Случайные величины могут быть описаны с использованием различных распределений. Выбор того или иного из них основан на его наилучшем соответствии собранным данным. Для

оценки этого соответствия можно использовать множество статистических тестов. В исследовании [2] использовался критерий  $\chi^2$  («хи-квадрат»). Случайные величины были протестированы для двух возможных типов распределений, а именно нормального и логнормального.

Калибровка коэффициента  $N_{kt}$  для данных СРТ проводилась авторами работы [2] с использованием функции предельного состояния  $Z$ . Цель состояла в определении значений, приводящих к желаемым уровням надежности, которые измерялись с точки зрения индекса надежности  $\beta$  – соотношения между средним значением  $Z$  и его стандартным отклонением:

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z}. \quad (9)$$

Индекс надежности  $\beta$  связан с вероятностью превышения  $P_e$  следующим образом:

$$P_e = \Phi(\beta), \quad (10)$$

где  $\Phi(\beta)$  – кумулятивная функция распределения для функции предельного состояния  $Z$ .

Индекс надежности  $\beta$  оценивался для каждого из 672 рассмотренных авторами статьи [2] случаев

$$(14 \text{ значений } N_{kt} \times 4 \text{ типа грунта} \times 6 \text{ соотношений } \sigma_{vo}/q_c \times 2 \text{ метода классификации} = 672). \quad (11)$$

Отношение бытового давления к лобовому сопротивлению  $\sigma_{vo}/q_c$  учитывалось при анализе надежности потому, что результаты должны охватывать широкий спектр возможностей (в проектном пространстве). В работе [2] во всех случаях для вычисления величины  $\beta$  использовался метод надежности первого порядка (FORM), основанный на разложении функции предельного состояния в ряд Тейлора первого порядка, который аппроксимирует поверхность разрушения касательной плоскостью в интересующей точке.

В таблице 1 представлен диапазон параметров, охваченный в исследовании надежности авторами статьи [2]. В таблицах 2 и 3 перечислены рекомендуемые значения коэффициента конусного зонда  $N_{kt}$  в зависимости от типа грунта и вероятности превышения  $P_e$ .

Таблица 1. Диапазон параметров, охваченный в исследовании надежности в работе [2]

Параметр		Диапазон
Коэффициент СРТ ( $N_{kt}$ )		12, 15, 18, 21, ... , 39, 42, 45, 48
Отношение $\sigma_{vo}/q_c$		0.05, 0.10, 0.20, 0.50, 0.80, 0.90
Классификация грунта	Robertson, 1990	2, 3, 4, 5
	Zhang and Tumay, 1999	> 75%, 50–75%, 25–50%, < 25%

Таблица 2. Значения  $N_{kt}$ , рекомендуемые для классификации Робертсона (Robertson, 1990)



Вероятность превышения	Величины $N_{kt}$ для разных классификаций грунтов			
	все	2	3	4
50% ( $\beta_T = 0,0$ )	27,5	18,6	26,2	30,9
55% ( $\beta_T = 0,1257$ )	31,1	21,0	28,6	34,3
66,7% ( $\beta_T = 0,4308$ )	42,0	28,5	35,7	45,0

Таблица 3. Значения  $N_{kt}$ , рекомендуемые для классификации Чжана и Тумая (Zhang, Tumay, 1999)

Вероятность превышения	Величины $N_{kt}$ для разных классификаций грунтов (глин)				
	все	> 75%	50–75%	25–50%	< 25%
50% ( $\beta_T = 0,0$ )	27,5	26,9	25,3	28,8	31,5
55% ( $\beta_T = 0,1257$ )	31,1	30,0	29,3	32,5	35,3
66,7% ( $\beta_T = 0,4308$ )	42,0	38,4	39,3	45,2	50,1

## Основные выводы

Для проведения анализа надежности измерений методом СРТ авторами работы [1] был использован метод надежности первого порядка (FORM), который учитывает все основные источники неопределенностей (свойства грунта, измерительные устройства, модель преобразования) для калибровки коэффициента конусного зонда  $N_{kt}$ , дающей возможность достигнуть необходимых уровней надежности. Выполненный в исследовании [2] анализ надежности дал значения  $N_{kt}$ , равные 27,5; 31,1 и 42,0, для целевых значений индекса надежности  $\beta_T$ , равных 0 (0%); 0,1257 (55%) и 0,4308 (66,7%) соответственно, если не учитывалась классификация грунта. Также были определены значения  $N_{kt}$  на основе двух разных классификаций, оптимальные для каждого типа грунта для трех целевых уровней надежности. Это в том числе показало, что значения  $N_{kt}$  для грунтов с более высоким содержанием глины ниже, чем при меньшем ее содержании.

Было определено, что классификация грунта является единственным аспектом, который четко влияет на оценки недренированной прочности по результатам СРТ. То есть использование единого значения  $N_{kt}$  для всех типов грунтов является неоправданным, поскольку это приведет к приемлемым результатам для одних грунтовых условий и к неприемлемым для других.

*Список литературы, использованной авторами статьи [2], можно посмотреть по адресу: [researchgate.net/publication/260228707\\_Reliability\\_Analysis\\_of\\_CPT\\_Measurements\\_for\\_Calculating\\_Undrained\\_Shear\\_Strength](https://researchgate.net/publication/260228707_Reliability_Analysis_of_CPT_Measurements_for_Calculating_Undrained_Shear_Strength).*

## Источники

1. Alshibli Kh.A., Okeil A.M., Alramahi B. Update of correlations between cone penetration and boring log data. Louisiana, USA: Louisiana Transportation Research Center, 2008. 147 p.
2. Alshibli Kh.A., Okeil A.M., Alramahi B., Zhang Z.J. Reliability analysis of CPT measurements for calculating undrained shear strength // Geotechnical Testing Journal. 2011. Vol. 34. № 6. P. 721–729. DOI:10.1520/GTJ103771. URL:

- [researchgate.net/publication/260228707\\_Reliability\\_Analysis\\_of\\_CPT\\_Measurements\\_for\\_Calculating\\_Undrained\\_Shear\\_Strength](https://researchgate.net/publication/260228707_Reliability_Analysis_of_CPT_Measurements_for_Calculating_Undrained_Shear_Strength).
3. Alshibli Kh.A., Okeil A.M., Alramahi B., Zhang Z.J. Statistical assessment of repeatability of CPT measurements // Contemporary Topics in In Situ Testing, Analysis, and Reliability of Foundations / M. Iskander, D. Laefer, M. Hussein (eds.). USA: ASCE, 2009. GSP № 186. P. 87–94.