

## ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ГРУНТОВ ПОД НИЖНИМ КОНЦОМ И ПО БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗАБИВНОЙ СВАИ

**Бекбасаров И.И.**, доктор техн. наук

(Таразский государственный университет им. М.Х. Дулати,  
г. Тараз, Казахстан)

В соответствии с положениями действующих строительных правил [1-3], несущая способность висячих забивных призматических свай, определяется на основе следующей формулы

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{cR} RA + u \sum \gamma_{cf} f_i h_i), \quad (1)$$

Обозначения, наименования и значения параметров, входящих в формулу (1), соответствуют данным, представленным в нормативных документах [1-3].

Данная формула была предложена около 60 лет назад [4], и в настоящее время входит в состав справочника геотехника [5] и современных учебников по основаниям и фундаментам [6-8]. Формула применяется не только в проектной и образовательной деятельности, но и в научной сфере, как для сравнительных расчетов, так и для модернизации формул по определению несущей способности свай различных конструкций [9-13]. Но, несмотря на востребованность и «долгожительство» использование формулы (1) сопровождается существенными затратами труда и времени. Одна из таких проблем связана с определением расчетных сопротивлений грунтов под нижним концом сваи  $R$  и по ее боковой поверхности  $f$ , входящих в состав данной формулы. Трудоемкость и продолжительность установления этих параметров особенно ощутима при выполнении расчетов по определению несущей способности свай, имеющих различную глубину погружения в пределах площадок с переменным многослойным напластованием грунтов.

Как известно, для выполнения расчетов по рассматриваемой формуле используются табличные значения расчетных сопротивлений грунтов, представленные в строительных правилах [1-3]. Для промежуточных глубин погружения нижнего конца сваи, средней глубины расположения слоя грунта, вида песчаного грунта и показателей текучести глинистых грунтов, значения расчетных сопротивлений  $R$  и  $f$  из таблиц норм [1-3] устанавливаются путем интерполяции. На практике специалистами используется линейная интерполяция. Причем одинарная линейная интерполяция применяется для песчаных грунтов, а билинейная (двойная) интерполяция – для глинистых грунтов. Применение интерполяции, как правило, повышает трудоемкость и продолжительность расчетов по определению несущей способности свай. К тому же, линейная интерполяция имеет определенные ограничения по области применения, что связано с обеспечением точности результатов, получаемых по ней. Так линейная интерполяция позволяет получать достоверные результаты лишь в следующих случаях [14]:

- во-первых, если зависимость между двумя известными значениями рассматриваемого параметра, для которого устанавливается его промежуточное значение, линейная;

- во-вторых, когда разница между двумя рассматриваемыми значениями данного параметра незначительная и не превышает его минимального значения.

Анализ табличных значений расчетных сопротивлений грунтов, представленных в строительных правилах [1-3], показывает, что зависимости расчетного сопротивления  $R$  от глубины погружения нижнего конца сваи  $L_p$  и показателя текучести глинистого грунта  $I_L$  в большинстве случаев представляют собой нелинейные функции. Нелинейными являются также зависимости расчетного сопротивления  $f$  от средней глубины расположения слоя и показателя текучести глинистого грунта  $I_L$ .

Сравнением табличных значений расчетных сопротивлений грунтов  $R$  выявлено, что разница  $\Delta R$  между соседними значениями расчетного сопротивления грунта  $R$  составляет от 50 кПа до 1200 кПа. Параметр  $\Delta R$  по величине сопоставим со значениями расчетного сопротивления грунтов  $R$ , а в ряде случаев даже пре-

вышает его минимальные значения. Сравнением табличных значений расчетных сопротивлений грунтов  $f$  выявлено, что разница  $\Delta f$  между соседними значениями расчетного сопротивления грунта  $f$  изменяется от нуля до 7 кПа. Параметр  $\Delta f$  по величине сопоставим со значениями расчетного сопротивления грунтов  $f$ , а в некоторых случаях даже в несколько раз превышает его минимальные значения.

Таким образом, можно утверждать, что применение линейной и особенно билинейной интерполяции для определения промежуточных значений расчетных сопротивлений грунтов  $R$  и  $f$ , не вполне приемлемо.

В данной ситуации, правомерно использование методов нелинейной интерполяции, которые основаны на формулах Ньютона, Лагранжа, Стирлинга, Бесселя и др. [14, 15]. Но, эти методы довольно сложны и трудоемки. К тому же возможность их эффективного применения для рассматриваемого случая до настоящего времени не оценена специалистами. Необходимость проведения такой оценки, прежде всего, вызвана тем, что каждая из существующих формул нелинейной интерполяции имеет свою ограниченную область применения, а также индивидуальные условия, критерии и точность вычислений.

На современном этапе исследований, учитывая, сложившиеся обстоятельства, в качестве альтернативного подхода к решению указанной проблемы, а именно для исключения одинарной интерполяции для песчаных грунтов и билинейной интерполяции для глинистых грунтов, автором для определения расчетных сопротивлений грунтов предлагается использовать корреляционные зависимости (2)-(7). Эти зависимости получены на основе компьютерной обработки табличных значений расчетных сопротивлений грунтов (рис. 1-4), представленных в своде правил [2].

$$R_1 = -\kappa L_p^2 + pL_p + R_{o1}, \quad (2)$$

$$R_2 = nL_p^3 - mL_p^2 + gL_p + R_{o2}, \quad (3)$$

$$R_3 = -tL_p^4 + vL_p^3 - zL_p^2 + dL_p + R_{o3}, \quad (4)$$

$$R_4 = wL_p^5 + rL_p^4 + sL_p^3 - cL_p^2 + uL_p + R_{o4}, \quad (5)$$

$$f_1 = -tL_{pc}^4 + nL_{pc}^3 - \kappa L_{pc}^2 + pL_{pc} + f_{o1}, \quad (6)$$

$$f_2 = cL_{pc}^5 - xL_{pc}^4 + zL_{pc}^3 - sL_{pc}^2 + uL_{pc} + f_{o2}, \quad (7)$$

где  $\kappa, p$  – коэффициенты, принимаемые по таблице 1;

$R_{o1}$  – расчетное сопротивление грунта, принимаемое по таблице 1;

$L_p$  – глубина погружения свай;

$n, m, g$  – коэффициенты, принимаемые по таблице 2;

$R_{o2}$  – расчетное сопротивление грунта, принимаемое по таблице 2;

$t, v, z, d$  – коэффициенты, принимаемые по таблице 3;

$R_{o3}$  – расчетное сопротивление грунта, принимаемое по таблице 3;

$w, r, s, c, u$  – коэффициенты, принимаемые по таблице 4;

$R_{o4}$  – расчетное сопротивление грунта, принимаемое по таблице 4;

$t, n, \kappa, p$  – коэффициенты, принимаемые: по таблице 5;

$f_{o1}$  – расчетное сопротивление грунта, принимаемое по таблице 5;

$L_{pc}$  – средняя глубина расположения слоя грунта, м;

$c, x, z, s, u$  – коэффициенты, принимаемые по таблице 6;

$f_{o2}$  – расчетное сопротивление, принимаемое по таблице 6.

Формула (2) применима для определения расчетного сопротивления  $R$  мелких и пылеватых песков, а также глинистых грунтов с показателем текучести равным 0,5, а формула (3) – для песков средней крупности, крупных и гравелистых песков, а также глинистых грунтов с показателем текучести равным нулю. Формула (4) позволяет определять расчетное сопротивление глинистых грунтов с показателем текучести равным 0,2, 0,3, 0,4 и 0,6, а формула (5) – для глинистых грунтов с показателем текучести равным 0,1. Показатели достоверности аппроксимации данных ( $R^2$ ) по формулам (2)-(5) близки к 1,0 и изменяются в пределах от 0,9900 до 0,9989, что свидетельствует о высокой точности рассматриваемых корреляционных зависимостей.

Формула (6) применима для определения расчетного сопротивления  $f$  крупного песка, песка средней крупности и глинистого грунта с показателем текучести 0,2. Формула (7) предназначена для определения расчетного сопротивления мелкого и пылеватого песков, а также глинистых грунтов с показателем текучести от 0,3 до 1,0. Показатели достоверности аппроксимации данных ( $R^2$ ) по формулам (6) и (7) близки к 1,0, и составляют для формулы (6) – 0,9975, для формулы (7) – 0,9451 – 0,9985.

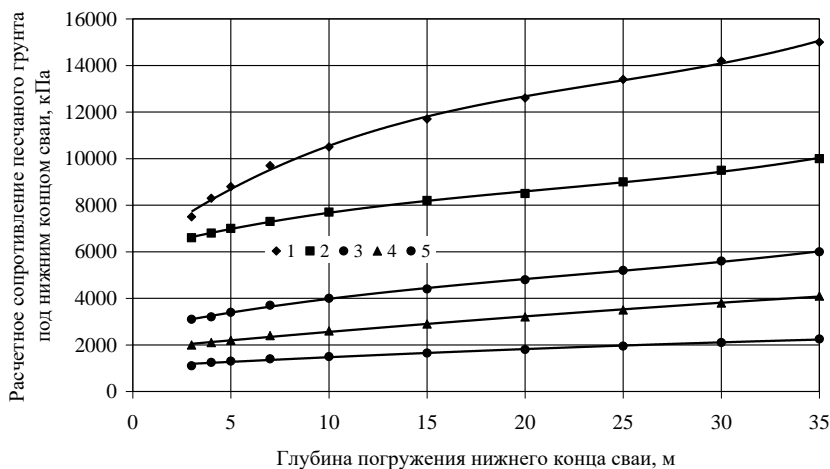


Рис. 1. Зависимость расчетного сопротивления  $R$  песчаных грунтов от глубины погружения нижнего конца сваи  $L_p$  :

1 – для гравелистого песка; 2 – для крупного песка; 3 – для песка средней крупности; 4 – для мелкого песка; 5 – для пылеватого песка.

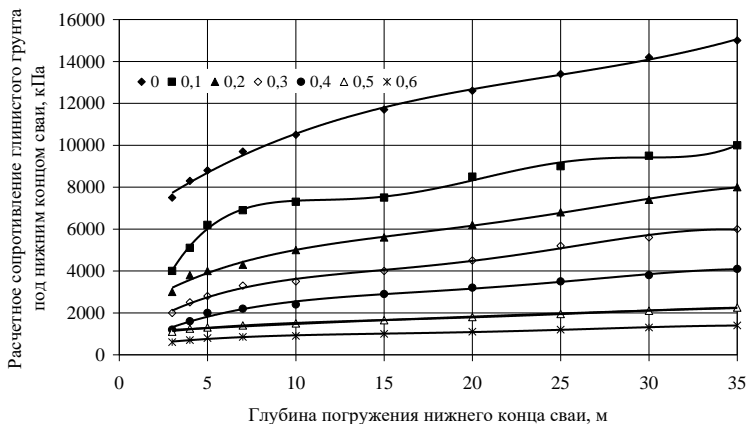


Рис. 2. Зависимость расчетного сопротивления  $R$  глинистых грунтов от глубины погружения нижнего конца сваи  $L_p$  при показателе текучести от 0 до 0,6

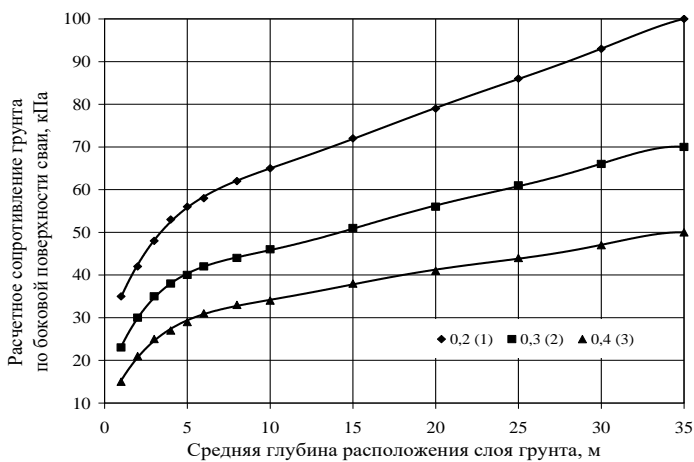


Рис.3. Зависимость расчетного сопротивления  $f$  песчаных и глинистых грунтов от средней глубины расположения слоя  $L_{pc}$  :

0,2 (1) – для глинистого грунта с показателем текучести 0,2, крупного песка и песка средней крупности; 0,3 (2) – для глинистого грунта с показателем текучести 0,3 и мелкого песка; 0,4 (3) – для глинистого грунта с показателем текучести 0,4 и пылеватого песка.

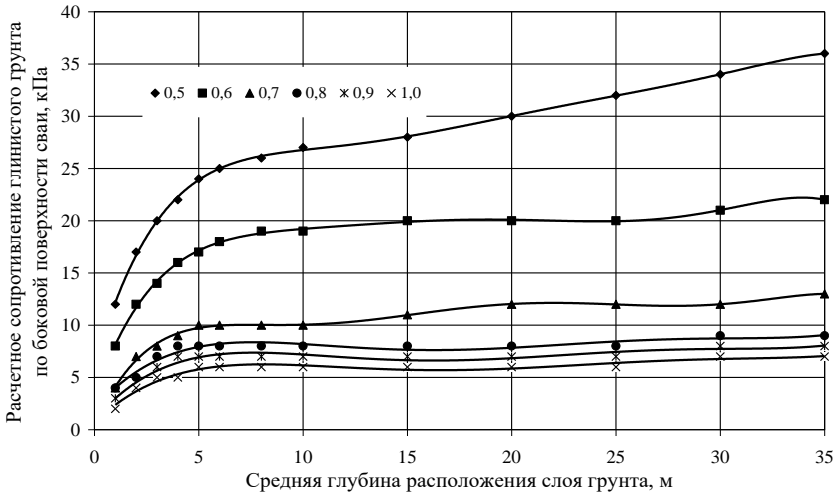


Рис. 4. Зависимость расчетного сопротивления глинистых грунтов  $f$  от средней глубины расположения слоя  $L_{pc}$  при показателе текучести от 0,5 до 1,0

Таблица 1

Значения коэффициентов  $\kappa$ ,  $\rho$  и расчетное сопротивление грунта  $R_{o1}$  в формуле (2)

Вид грунта под нижним концом сваи	Расчетное сопротивление $R_{o1}$ , кПа	Значения коэффициентов		Показатель аппроксимации $R^2$
		$\kappa$ , кН/м <sup>4</sup>	$\rho$ , кН/м <sup>3</sup>	
Песок мелкий	1814,3	0,3892	78,234	0,9981
Песок пылеватый или глинистый грунт с $I_L = 0,5$	1057,2	0,3158	44,521	0,9900

Таблица 2

Значения коэффициентов  $n, m, g$  и расчетное сопротивление грунта

$R_{o2}$  в формуле (3)

Вид грунта под нижним концом сваи	Расчетное сопротивление $R_{o2}$ , кПа	Значения коэффициентов			Показатель аппроксимации $R^{\wedge 2}$
		$n$ , кН/м <sup>5</sup>	$m$ , кН/м <sup>4</sup>	$g$ , кН/м <sup>3</sup>	
Гравелистый песок или глинистый грунт с $I_L = 0$	6011,9	0,2837	20,57	630,98	0,9977
Крупный песок	6015,6	0,1096	6,9727	224,51	0,9986
Песок средней крупности	2618,0	0,0665	4,5451	174,81	0,9989

Таблица 3

Значения коэффициентов  $t, v, z, d$  и расчетное сопротивление грунта  $R_{o3}$  в формуле (4)

Показатель текучести глинистого грунта	Расчетное сопротивление $R_{o3}$ , кПа	Значения коэффициентов				Показатель аппроксимации $R^{\wedge 2}$
		$t$ , кН/м <sup>6</sup>	$v$ , кН/м <sup>5</sup>	$z$ , кН/м <sup>4</sup>	$d$ , кН/м <sup>3</sup>	
$I_L = 0,2$	1742,6	0,013	1,1493	35,933	583,51	0,9950
$I_L = 0,3$	663,62	0,0195	1,5808	44,256	599,61	0,9955
$I_L = 0,4$	241,15	0,0106	0,9295	28,962	437,65	0,9911
$I_L = 0,6$	345,32	0,0034	0,2911	8,4723	117,46	0,9928



Таблица 4

Значения коэффициентов  $w, r, s, c, u$  и расчетное сопротивление грунта  $R_{o4}$  в формуле (5)

Показатель текучести глинистого грунта	Расчетное сопротивление $R_{o4}$ , кПа	Значения коэффициентов				
		$w$ , кН/м <sup>7</sup>	$r$ , кН/м <sup>6</sup>	$s$ , кН/м <sup>5</sup>	$c$ , кН/м <sup>4</sup>	$u$ , кН/м <sup>3</sup>
$I_L = 0,1$	2328,5	0,0052	0,5364	20,648	365,56	3043,2

Таблица 5.

Значения коэффициентов  $t, n, \kappa, p$  и расчетное сопротивление грунта  $f_{o1}$  в формуле (6)

Вид грунта по боковой поверхности сваи	Расчетное сопротивление $f_{o1}$ , кПа	Значения коэффициентов			
		$t$ , кН/м <sup>6</sup>	$n$ , кН/м <sup>5</sup>	$\kappa$ , кН/м <sup>4</sup>	$p$ , кН/м <sup>3</sup>
Песок крупный, песок средней крупности или глинистый грунт с $I_L = 0,2$	29,603	0,0002	0,0178	0,5113	7,2297

Таблица 6

Значения коэффициентов  $c, x, z, s, u$  и расчетное сопротивление грунта  $f_{o2}$  в формуле (7)

Вид грунта по боковой поверхности сваи	Расчетное сопротивление $f_{o2}$ , кПа	Значения коэффициентов				
		$c$ , кН/м <sup>7</sup>	$x$ , кН/м <sup>6</sup>	$z$ , кН/м <sup>5</sup>	$s$ , кН/м <sup>4</sup>	$u$ , кН/м <sup>3</sup>
Песок мелкий, глинистый грунт с показателем текучести $I_L = 0,3$	16,243	1E-05	0,0015	0,0568	0,9739	8,4246
Песок пылеватый, глинистый грунт $I_L = 0,4$	9,598	1E-05	0,0011	0,0432	0,7598	6,7965
$I_L = 0,5$	7,0027	1E-05	0,001	0,0402	0,7154	6,0665
$I_L = 0,6$	4,4757	6E-06	0,0007	0,0265	0,4979	4,4278
$I_L = 0,7$	1,5137	9E-06	0,0009	0,03	0,4667	3,3202
$I_L = 0,8$	1,9561	4E-06	0,0004	0,0166	0,2975	2,3155
$I_L = 0,9$	0,9561	4E-06	0,0004	0,0166	0,2975	2,3155
$I_L = 1,0$	0,669	3E-06	0,0003	0,0128	0,237	1,9235

Для оценки погрешностей определения расчетных сопротивлений грунтов методом линейной интерполяции выполнены соответствующие расчеты, а именно значения расчетных сопротивлений  $R$

и  $f$ , полученные по формулам (2)-(7), сопоставлены со значениями, установленными методом линейной интерполяции. Выявлено, что применение интерполяционного метода приводит к снижению точности определения значений расчетных сопротивлений  $R$  для песчаных грунтов до 2,9% (рис. 5), а для глинистых грунтов – до 5,3 % (рис. 6). Установлено также, что применение интерполяционного метода приводит к снижению точности определения значений расчетных сопротивлений  $f$  для песчаных грунтов до 8,4% (рис.7), а для глинистых грунтов – до 9,7 % (рис. 8). Из рисунков (5)-(8) видно, что наибольшие значения относительной погрешности имеют место при малых значениях расчетных сопротивлений грунтов. Кроме того, необходимо иметь в виду, что указанная погрешность в расчетах будет иметь место при каждом определении промежуточных значений расчетных сопротивлений грунтов.

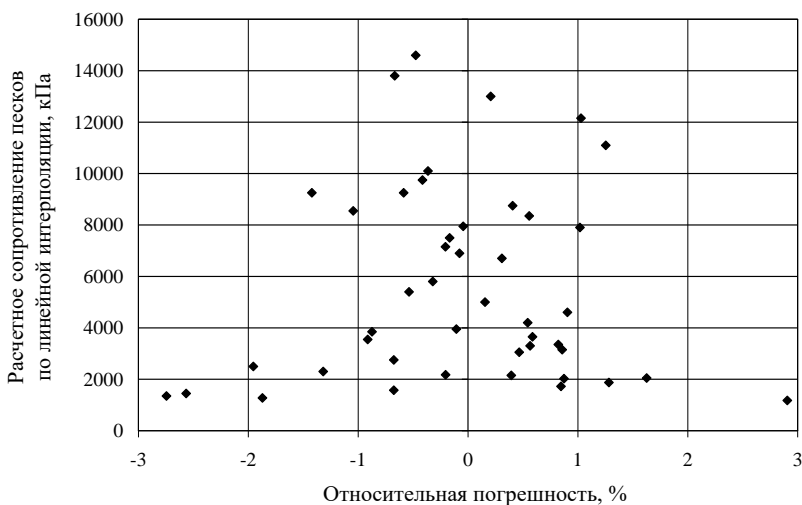


Рис. 5. Распределение относительной погрешности при определении расчетного сопротивления  $R$  песчаных грунтов

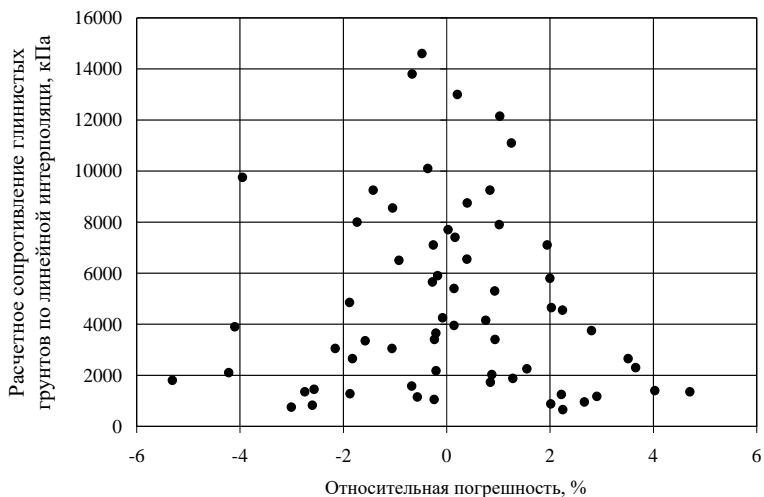


Рис. 6. Распределение относительной при определении расчетного сопротивления  $R$  глинистых грунтов

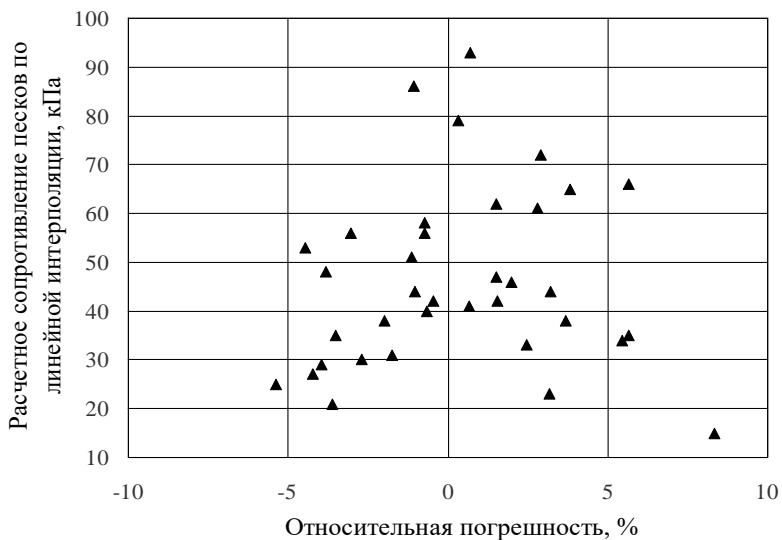


Рис. 7. Распределение относительной погрешности при определении расчетного сопротивления  $f$  песчаных грунтов

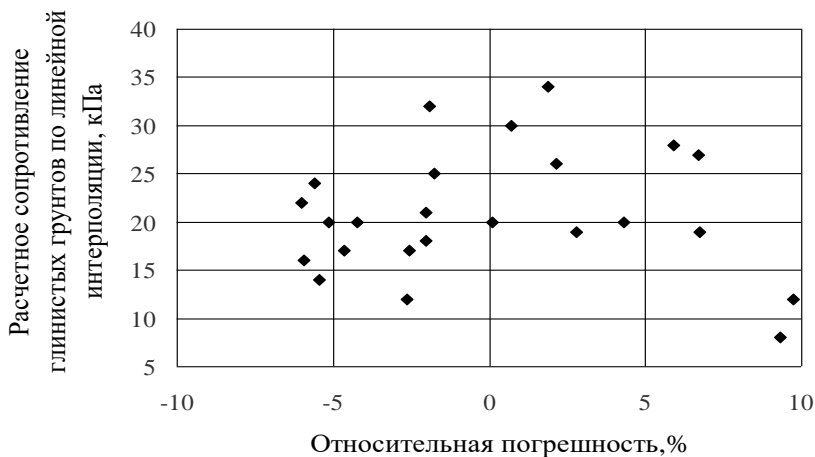


Рис. 8. Распределение относительной погрешности при определении расчетного сопротивления  $f$  глинистых грунтов

Применение формул (2)-(7) позволяет полностью исключить использование интерполяции для определения расчетных сопротивлений песчаных грунтов. Использование формул для глинистых грунтов позволяет отказаться от одинарной линейной интерполяции, которая традиционно применяется для определения расчетных сопротивлений при промежуточных значениях глубины погружения сваи и средней глубины расположения слоя грунта. Но, при этом для этих грунтов сохраняется необходимость использования одинарной линейной интерполяции для определения их расчетных сопротивлений при промежуточных значениях показателя текучести грунтов. Таким образом, для глинистых грунтов исключается билинейная интерполяция, но сохраняется одинарная линейная интерполяция.

## ЛИТЕРАТУРА

1. МСП 5.01-101-2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов. – Астана, 2007. – 110 с.
2. СП РК 5.01-103-2013. Свайные фундаменты. – Астана: МНЭ РК, 2015. – 88 с.
3. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85. – М.: Минрегион РФ, 2016. – 67 с.

4. Цытович Н.А., Веселов В.А., Кузмин П.Г. и др. Основания и фундаменты. – М.: Госстройиздат, 1959. – 452 с.

5. Ильичев В.А., Мангушев Р.А. и др. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. – М.: Ассоциация строительных вузов, 2014. – 490 с.

6. Пусков В.И., Караулов А.М., Смолин Ю.П., Королев К.В., Крицкий М.Я. Основания и фундаменты транспортных сооружений. Электронный учебник для студентов строительных специальностей транспортных вузов. – Новосибирск: СГУПС, 2009. – 292 с.

7. Мангушев Р.А., Карлов В.Д., Сахаров И.И., Осокин А.И. Основания и фундаменты. Учебник. – М.: Ассоциация строительных вузов, 2013. – 392 с.

8. Мангушев Р.А., Готман А.Л., Знаменский В.В., Пономарев А.Б. Сваи и свайные фундаменты. – М.: Ассоциация строительных вузов, 2015. – 320 с.

9. Школьников И.Е. Определение несущей способности стальных трубчатых свай // Геотехника. – 2014. – №4. – С. 42-58.

10. Глухов В.С., Ахрамеев А.В., Галова Ю.С. Проблемы рационального использования бетона и арматуры при устройстве буронабивных свай под колонну здания // Международная научно-техническая конференция: Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение. – Санкт-Петербург, 2014. – Часть I. – С. 158-160.

11. Бекбасаров И.И., Исаков Г.И., Атенев Е.И. Формулы для расчета несущей способности новых забивных свай на вдавливающую нагрузку // Международная научно-практическая конференция: Современная строительная наука, состояние и перспективы развития. – Алматы, 2016. – С. 88-90.

12. Соколов Н.С., Рябинов В.М. Особенности устройства и расчета буроинъекционных свай с многомерными уширениями // Геотехника. – 2016. – №3. – С. 60-64.

13. Жусупбеков А.Ж., Утепов Е.Б., Утепова М.Т., Омаров А.Р., Калданова Б.О. Прогноз поведения свай в полевых испытаниях при помощи центрифуги // Международная научно-техническая конференция: Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение. – Санкт-Петербург, 2014. – Часть II. – С. 58-64.

14. Половко А.М., Бутусов П.Н. Интерполяция. Методы и компьютерные технологии их реализации. – Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2004. – 320 с.

15. Никитин Д. Поиск простейшего интерполянта. – Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 245 с.

УДК 624.159.4

## **АСПЕКТЫ КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИЙ ВОЗВОДИМЫХ В ГРУНТЕ ПО СТРУЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

**Богов С. Г., инж.**

(ООО «ИСП Геореконструкция»,  
г. Санкт-Петербург, Россия)

### **Аннотация**

Освоение подземного пространства является главной тенденцией современного нового строительства и реконструкции старых зданий. Большая сложность этой задачи связана с условием сохранения исторического центра городов, где и нужны многофункциональные подземные сооружения. Так, создание на толще слабых грунтов Санкт-Петербурга специальных паркингов, подвальных этажей – сложная геотехническая задача. При том, что допускаемые предельные осадки, как реконструируемого, так и соседних зданий ограничиваются требованиями, как отечественных норм СНиП 2.02.01 «Основания зданий и сооружений», так и европейских нормативов EC-7 «Геотехническое проектирование». В условиях слабых и значимых толщ грунта возникла весьма перспективная возможность создания сплошной завесы на определенной расчетами глубине. Это позволяет решать многие реконструкционные задачи, когда плотные и сильнофильтрующие грунты находятся на большой глубине. Нужны технологии по созданию вертикальных создаваемых столбов и завес для обеспечения надежной гидроизоляции подземных объемов на длительные годы, не прибегая к последующим откачкам воды из подземных сооружений. Такие работы выполнялись экспериментально и на реальных объектах. Перспектив-