

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.159.5

*ТАРАСОВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ, аспирант,
tar.a.a@mail.ru
Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА РАСЧЁТА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ В СЛАБЫХ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТАХ*

Усовершенствован метод расчёта несущей способности инъекционных свай в слабых глинистых грунтах с использованием данных о вдавливании инъектора. Приведены результаты натурных экспериментов и численного моделирования в программном комплексе PLAXIS 3D. Получены переходные коэффициенты от сопротивления грунта вдавливанию инъектора к расчётному сопротивлению грунта под нижним концом инъекционной сваи. Уточнены коэффициенты условий работы грунта на боковой поверхности инъекционной сваи. Приведено сравнение экспериментальных и расчётных данных.

Ключевые слова: инъекционная свая; PLAXIS 3D; метод расчёта; несущая способность свай; переходной коэффициент; коэффициент условий работы грунта на боковой поверхности сваи.

*ALEKSANDR A. TARASOV, Research Assistant,
tar.a.a@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

IMPROVEMENT OF BEARING CAPACITY DESIGN TECHNIQUE FOR INJECTION PILES IN SOFT CLAY SOILS

The paper presents the improved design method of bearing capacity for injection piles based on data obtained from the injector indentation. Field experiments and numerical simulation are carried out using the software package PLAXIS 3D. The transition ratios between the soil resistance to the injector indentation and estimated soil resistance under the lower end of the injection piles are determined in this paper. The specific-conditions-of-use factor of the lateral surface of the injection pile is obtained herein. The comparative analysis is presented for the experimental and theoretical findings.

* Работа выполнялась под руководством докт. техн. наук, профессора А.И. Полищука.

Keywords: injection pile; PLAXIS 3D; design technique; load-bearing capacity; transition coefficient; specific-conditions-of-use factor.

При усилении фундаментов реконструируемых и восстанавливаемых зданий в глинистых грунтах всё большее распространение получают инъекционные сваи, изготавливаемые в грунте с применением инъекторов специальной конструкции [1–3]. К настоящему времени выполнен целый ряд исследований по устройству и работе инъекционных свай¹ в глинистых грунтах [3–4]; способ прошёл апробацию и внедрён на ряде объектов в г. Томске. Однако вопросы расчёта несущей способности инъекционных свай в слабых глинистых грунтах² разработаны пока недостаточно, что связано с трудностью определения характеристик слабого глинистого грунта вокруг инъекционной сваи после ее устройства [5].

Для совершенствования метода расчёта несущей способности инъекционных свай в слабом глинистом грунте рассмотрим отдельно работу их нижнего конца и отдельно боковой поверхности. Тогда, в общем случае, формулу для определения несущей способности инъекционной сваи можно представить в виде

$$F_d = F_{\text{нк}} + F_{\text{бок}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{бок}}$ – сопротивление грунта на боковой поверхности инъекционной сваи; $F_{\text{нк}}$ – сопротивление грунта под нижним концом инъекционной сваи.

Одним из путей решения поставленной задачи являлось численное моделирование работы инъекционной сваи в программном комплексе PLAXIS 3D. Для раздельного определения слагаемых, входящих в формулу (1), инъекционные сваи, устроенные при проведении натурных экспериментов³, были смоделированы составными, в виде жёсткой полой трубы (*pile – circular tube*) и наконечника на её нижнем конце (рис. 1). Наконечник моделировался в виде круглого жёсткого штампа (*Floor*). Грунтовые условия экспериментальных площадок моделировались с помощью упругопластической модели грунта Мора – Кулона. Размеры модели принимались такими, при которых её влияние на развитие осадки инъекционной сваи от прикладываемой нагрузки не превышало 0,5 мм [6].

На первом этапе автором было выполнено моделирование совместного нагружения инъекционной сваи в слабом глинистом грунте с включением в работу боковой поверхности и нижнего конца. При этом физико-

¹ Под инъекционными понимаются сваи, которые формируются в предварительно подготовленных скважинах путём инъекции под давлением подвижной бетонной смеси с последующей опрессовкой системы «свая – грунт основания» (по определению А.И. Полищука, А.А. Петухова, 2005 г.) [8].

² Здесь и далее под слабыми глинистыми грунтами понимаются водонасыщенные глинистые грунты с коэффициентом водонасыщения $S_r > 0,8$ и модулем деформаций $E < 5$ МПа.

³ Помимо собственных экспериментальных исследований автора, в работе использованы результаты испытаний инъекционных свай статической вдавливающей нагрузкой, выполненные А.А. Петуховым, Р.В. Шалгиновым и др. в г. Кемерове (2003 г.) [8], а также в г. Томске (2005 г.) [8, 9], на площадках, сложенных глинистыми грунтами мягкопластичной – текучей консистенции.

механические характеристики слабого глинистого грунта вокруг сваи условно принимались равными естественному залеганию. Это связано с возможностями программного комплекса PLAXIS 3D моделирования процесса расширения скважины инъекционной сваи (формирования бетонного ствола) давлением, превышающим значения предельной прочности грунтов. Полученные результаты моделирования работы инъекционной сваи в слабом глинистом грунте обобщались, анализировались в виде таблиц и графиков. Графики зависимости осадок инъекционных свай (С-7, С-12) от прикладываемой нагрузки $s = f(N)$, полученных при их статических испытаниях и численном моделировании нагружения, приведены на рис. 2.

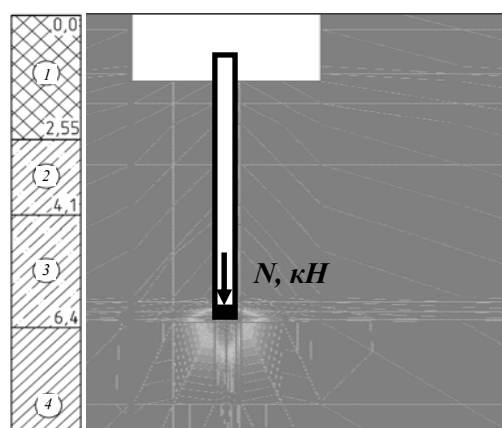


Рис. 1. Схема моделирования раздельного нагружения инъекционной сваи в слабом глинистом грунте на ПК PLAXIS 3D:

1 – насыпной грунт; 2 – супесь пластичная; 3 – супесь текучая; 4 – суглинок текучий

Сопоставление графиков $s = f(N)$, полученных при моделировании совместного нагружения натуральных свай, с результатами их статических испытаний показало, что они имеют хорошую сходимость (рис. 2).

При этом несущая способность инъекционных свай по результатам натуральных экспериментов оказалась больше на 5...15 %, чем по данным численного моделирования. Это объясняется тем, что при моделировании не учитывалось изменение физико-механических характеристик слабого глинистого грунта вокруг инъекционной сваи на этапе расширения скважины бетонной смесью.

На втором этапе автором было смоделировано нагружение нижнего конца инъекционной сваи. Было установлено, что при достижении осадки нижнего конца сваи 5...7 мм графики $s = f(N)$ для случаев совместного нагружения инъекционной сваи и нагружения только её нижнего конца становятся практически параллельными (рис. 3). Это согласуется с результатами исследований Б.И. Далматовым и Ф.К. Лапшиным (1966 г.) несущей способности предварительно изготовленных (готовых) свай в слабых глинистых грунтах [7].

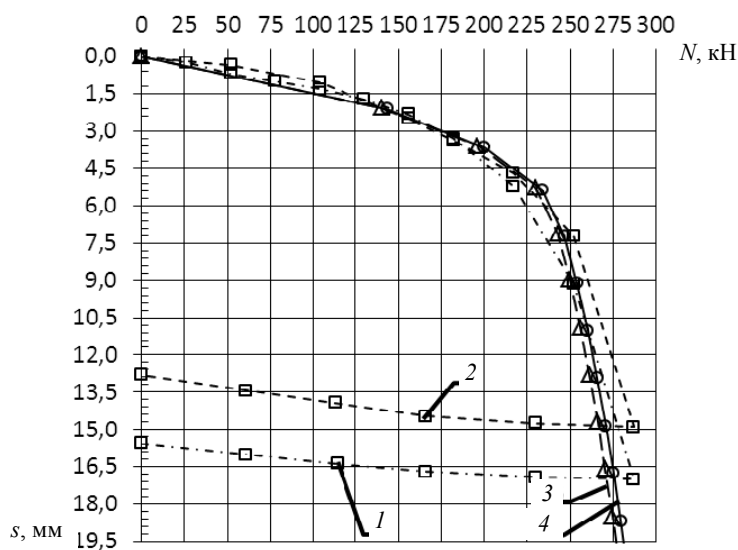


Рис. 2. Зависимость $s = f(N)$:

1, 2 – соответственно натурные испытания инъекционных свай С-7, С-12; 3, 4 – численное моделирование совместной работы инъекционных свай С-7, С-12

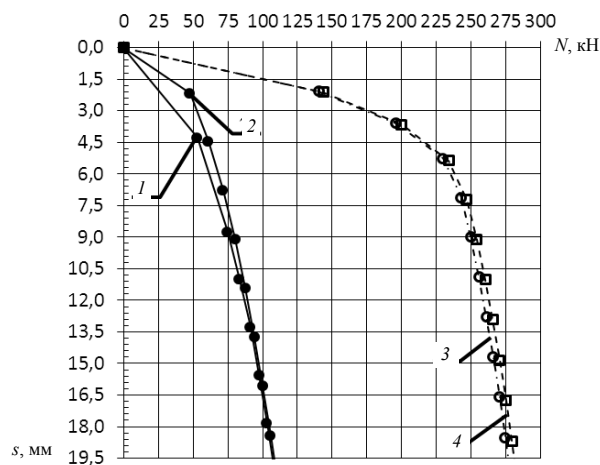


Рис. 3. Зависимость $s = f(N)$:

1, 2 – моделирование работы грунта под нижним концом инъекционных свай С-7 и С-12; 3, 4 – моделирование совместной работы грунта на боковой поверхности и под нижним концом инъекционных свай С-7, С-12

Таким образом, анализ результатов численного моделирования и их сопоставление с натурными экспериментами свидетельствуют о возможности применения предложенного подхода к раздельному моделированию работы грунта под нижним концом и на боковой поверхности инъекционных свай.

В табл. 1 приведены результаты определения несущей способности инъекционной сваи под ее нижним концом (несущей способности грунта под нижним концом инъекционной сваи) в ПК PLAXIS 3D. За несущую способ-

ность сваи принималась такая нагрузка, при которой осадка её нижнего конца достигала значений, полученных при проведении натурных испытаний. Данный подход к назначению несущей способности свай по результатам моделирования используется и другими специалистами (Ю.М. Шеменков и А.О. Глазычев, 2012 г. и др. [10]).

Таблица 1

**Результаты моделирования раздельного нагружения
нижнего конца инъекционных свай в PLAXIS 3D**

Марка сваи	Диаметр сваи, м	Грунты под нижним концом сваи	Несущая способность сваи под ее нижним концом $F_{нк}$, кПа
С-7	0,22	Супесь текучая	98,1
С-12	0,23		100,1
Си1	0,24	Супесь текучая	81,0
Си3	0,25		87,5
Си4	0,26		95,0
Ис8	0,27	Суглинок текучий	55,0
Ис9	0,30		67,0
Ис10	0,30		67,0
Ис11	0,33		91,0

В ходе выполнения исследований автором было установлено, что между величиной сопротивления грунта вдавливанию инъектора $q_{вд}$ и расчётным сопротивлением грунта под нижним концом инъекционной сваи $R_{нк}$ существует зависимость. Следовательно, несущая способность инъекционной сваи, реализуемая только под её нижним концом, может быть выражена через сопротивление грунта вдавливанию, аналогично подходу, применяемому при обработке результатов статического зондирования грунтов:

$$F_{нк} = R_{нк} A = \gamma_{сR} q_{вд} A, \quad (2)$$

где $R_{нк}$ – расчётное сопротивление грунта под нижним концом инъекционной сваи, кПа; $q_{вд} = \frac{N_{вд}}{A_{ин}}$ – сопротивление грунта вдавливанию инъектора, кПа;

$N_{вд}$ – усилие вдавливания инъектора, определяемое непосредственно по результатам вдавливания инъекторов на конкретной строительной площадке или по методу, изложенному в работе [4], кН; $A_{ин}$ – площадь уширения нижнего конца инъектора, м²; A – площадь поперечного сечения инъекционной сваи, м²; $\gamma_{сR}$ – переходной коэффициент от сопротивления грунта вдавлива-

нию инъектора $q_{вд}$ к расчётному сопротивлению грунта под нижним концом инъекционной сваи $R_{нк}$.

Переходной коэффициент γ_{cR} между расчётным сопротивлением грунта под нижним концом инъекционной сваи $R_{нк}$ и $q_{вд}$ можно определить, используя экспериментальные данные сопротивления грунта вдавливанию инъектора $q_{вд}^{экс}$ и результаты численного моделирования сопротивления грунта под нижним концом инъекционной сваи $R_{нк}^{pl}$. Тогда коэффициент γ_{cR} будет равен

$$\gamma_{cR} = \frac{R_{нк}^{pl}}{q_{вд}^{экс}}, \quad (3)$$

где $R_{нк}^{pl}$ – расчётное сопротивление грунта под нижним концом инъекционной сваи, полученное с использованием численного моделирования в PLAXIS 3D; $q_{вд}^{экс}$ – сопротивление грунта под нижним концом инъектора при его погружении, полученное по результатам натурного эксперимента.

В результате сопоставления экспериментальных и численных данных автором была получена следующая аппроксимирующая функция:

$$\gamma_{cR} = -0,232Ln(q_{вд}) + 2,6346. \quad (4)$$

Выполненные расчёты показали, что при сопротивлении грунта вдавливанию инъектора до $q_{вд} = 3500$ кПа коэффициент γ_{cR} колеблется в пределах $\gamma_{cR} = 0,75 \dots 1,0$ (рис. 4), что согласуется с результатами исследований Э. Мензенбаха, Ж. Керезеля, А. Пека (1960–1970 гг.) и других, а также с данными, приведёнными в СП 24.13330.2011 для статического зондирования грунтов.

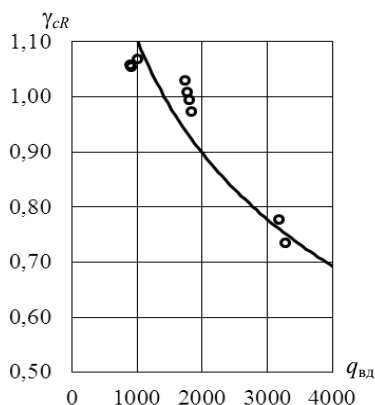


Рис. 4. Зависимость между переходным коэффициентом γ_{cR} и сопротивлением грунта вдавливанию инъектора $q_{вд}$

Несущую способность инъекционной сваи на боковой поверхности можно найти по следующей формуле:

$$F_{бок} = f \cdot h \cdot u, \quad (5)$$

где f – сопротивление грунта на боковой поверхности сваи, кПа; u – периметр сваи, м; h – толщина слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью, м.

Для определения физико-механических свойств грунта вокруг инъекционной сваи после расширения скважины в радиальном направлении необходимо проведение специальных трудоёмких исследований, не входящих в стандартный объём инженерно-геологических. Кроме того, в ходе расширения скважины происходит диффузия частичек цемента в околосвайный грунт, что также усложняет определение фактического сопротивления грунта на боковой поверхности инъекционной сваи. Поэтому было решено сопротивление грунта на боковой поверхности f определять с использованием физико-механических свойств грунта, без учёта их изменения в процессе устройства сваи, а рост несущей способности на боковой поверхности $F_{бок}$ сваи учитывать коэффициентом условия работы грунта γ_{cf} . Следовательно, коэффициент условий работы γ_{cf} грунта на боковой поверхности инъекционной сваи можно определять по формуле

$$\gamma_{cf} = \frac{F_{бок,pl}}{F_{бок}}, \quad (6)$$

где $F_{бок,pl}$ – несущая способность сваи по боковой поверхности, определяемая как разность между общей несущей способностью сваи по грунту F_d , полученной экспериментально, и несущей способностью под нижним концом сваи $F_{нк}$, полученной численно; $F_{бок} = u \sum [(\sigma_{zi} \xi_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i) h_i]$ – сопротивление грунта на боковой поверхности сваи, полученное при его природных характеристиках; u – наружный периметр инъекционной сваи, м; h_i – толщина i -го слоя грунта, соприкасающегося с боковой поверхностью сваи, м; σ_{zi} – напряжения от собственного веса грунта, расположенного выше i -го слоя; $\operatorname{tg} \varphi_i$ – коэффициент внутреннего трения i -го слоя грунта; ξ_i – коэффициент бокового давления i -го слоя грунта; c_i – удельное сцепление i -го слоя грунта.

Анализ данных, полученных по формуле (6), показал, что значения коэффициента γ_{cf} изменяются от 1,05 до 1,5, что свидетельствует об улучшении условий работы слабого глинистого грунта на боковой поверхности инъекционных свай, обусловленное образованием цементно-грунтовой рубашки на границе «свая – грунт» при радиальном расширении скважины бетонной смесью, формированием неровной поверхности ствола сваи, а также процессами фильтрации и уплотнения грунта.

Наилучшая сходимость расчётных и экспериментальных данных, при наименьшем среднеквадратичном и среднеарифметическом отклонении, достигается при $\gamma_{cf} = 1,25$ для пластичных – текучих супесей и 1,05 для текучепластичных – текучих суглинков. Более высокое значение коэффициента γ_{cf} для супесей можно объяснить их лучшими фильтрационными характеристиками по сравнению с суглинками.

Окончательно формулу для определения несущей способности инъекционной сваи можно записать в виде

$$F_d = F_{нк} + \gamma_{cf} u \sum [(\sigma_{zi} \xi_i \operatorname{tg} \varphi_i + c_i) h_i], \quad (7)$$

где $F_{нк}$ – несущая способность инъекционной сваи в уровне ее нижнего конца, определяемая по формуле (2); остальные обозначения те же, что и в формулах (5) и (6).

В табл. 2 приведено сопоставление результатов расчёта несущей способности инъекционных свай, полученных по формуле (7), с результатами их натуральных испытаний статической вдавливающей нагрузкой.

Таблица 2

**Сопоставление несущей способности инъекционных свай,
полученных по формуле (7), с экспериментальными данными**

Марка свай	Несущая способность по результатам эксперимента, кН	Несущая способность сваи по расчёту (формула (7), кН)			Расхождение с экспериментом, %
		общая (F_d)	острия ($F_{нк}$)	боковой поверхности ($F_{бок}$)	
С-7	287	251,0	96,3	154,70	12,5
С-12	287	269,8	103,0	166,72	6,0
Си1	200	197,6	73,0	124,63	1,2
Си3	200	207,2	78,0	129,24	-3,6
Си4	230	220,8	86,9	133,85	4,0
Ис8	120	117,1	52,9	64,28	2,4
Ис9	137,5	136,9	65,5	71,42	0,5
Ис10	137,5	136,9	65,5	71,4	0,5
Ис11	187,5	163,1	82,2	80,94	13,0

Примечание. Знак «-» в столбце 6 означает, что несущая способность по эксперименту меньше, чем по расчёту.

Таким образом, несущая способность инъекционных свай, полученная расчётом с использованием данных о сопротивлении вдавлыванию инъекторов в слабый глинистый грунт, имеет хорошую сходимость с результатами натуральных испытаний, расхождения не превышают 15 %. Следует также отметить, что определение несущей способности инъекционной сваи через усилие вдавливания (сопротивление грунта вдавлыванию) инъектора в слабых глинистых грунтах даёт возможность выполнять операционный контроль несущей способности инъекционных свай в процессе их устройства на строительной площадке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Полищук, А.И. Пат. № 2238366 Российская Федерация Е 02 D 5/34 /Способ устройства инъекционной сваи / Полищук А.И., Петухов А.А. [и др.]. Заявл. 04.03.2003. Опубл. 20.10.2004.
2. Полищук, А.И. Пат. № 87718 Российская Федерация, МПК7 Е 02 D 5/34. Инъекционная свая / Полищук А.И., Тарасов А.А., Шалгинов Р.В.; Заявл. 11.01.2009. Опубл. 20.10.2009
3. Полищук, А.И. Пат. № 129522 Российская Федерация, МПК7 Е 02 D 5/34. Инъекционная свая для слабых глинистых грунтов / Полищук А.И., Тарасов А.А.; опубл. 15.01.13

4. Полищук, А.И. Определение усилия вдавливания инъектора инъекционных свай в глинистых грунтах / А.И. Полищук, А.А. Тарасов, А.А. Петухов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 2. – С. 346–354.
5. Полищук, А.И. Оценка несущей способности инъекционных свай по данным статического зондирования / А.И. Полищук, А.А. Тарасов // Материалы Международной научно-технической конференции «Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении» ЮРГПУ. – Новочеркасск, 2015. – С. 419–424.
6. *Руководство пользователя по PLAXIS*. – СПб. : НИП-Информатика, 2005. – 207 с.
7. Далматов, Б.И. Механика грунтов, основания и фундаменты (включая специальный курс инженерной геологии) / Б.И. Далматов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. – 415 с.
8. Петухов, А.А. Совершенствование способа устройства инъекционных свай в слабых глинистых грунтах для условий реконструкции зданий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2006. – 23 с.
9. Шалгинов, Р.В. Совершенствование метода расчёта инъекционных свай в глинистых грунтах для фундаментов реконструируемых зданий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2010. – 22 с.
10. Шаменков, Ю.М. Расчёт буронабивных свай в глинистых грунтах по данным статического зондирования / Ю.М. Шаменков, А.О. Глазычев // Основания и фундаменты, подземные сооружения. – 2012. – № 3. – С. 81–85.

REFERENCES

1. Polishchuk A.I., Petuhov A.A., et al. Pat. Rus. Fed. N 2238366, IPC E 02 D 5/34. Sposob ustrojstva in"ekcionnoj svai [Injection pile arrangement method]. Appl. 04.03.2003. Publ. 20.10.2004.
2. Polishchuk A.I., Tarasov A.A., Shalginov R.V. Pat. Rus. Fed. N 87718, IPC 7 E 02 D 5/34. In"ektsionnaya svaya [Injection pile]. Appl. 11.01.2009. Publ. 20.10.2009.
3. Polishchuk A.I., Tarasov A.A. Pat. Rus. Fed. N 129522, IPC 7 E 02 D 5/34. In"ektsionnaya svaya dlya slabых glinistykh gruntov [Injection pile for soft soils]. Publ. 15.01.13.
4. Polishchuk A.I., Tarasov A.A., Petuhov A.A. Opredelenie usiliya vдавlivaniya in"ektora in"ekcionnykh svaj v glinistykh gruntah [Determination of indentation load of injection piles in clay soils]. *Vestnik TSUAB*, 2013. No. 2. Pp. 346–354. (rus)
5. Polishchuk A.I., Tarasov A.A. Ocenka nesushchej sposobnosti in"ekcionnykh svaj po dan-nym staticheskogo zondirovaniya [Load-bearing capacity of injection piles detected by static penetration test]. *Proc. Int. Sci. Conf. 'Soil Mechanics in Geotechnology and foundation engineering*. 2015. Pp. 419–424.(rus)
6. Rukovodstvo pol'zovatelya po PLAXIS [PLAXIS manual]. St-Petersburg : NIP-Informatika Publ., 2005. 207 p. (rus)
7. Dalmatov B.I. Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenti (vкlyuchaya spetsial'nyi kurs inzhenernoi geologii) [Soil mechanics and foundation engineering]. Leningrad : Stroyizdat Publ., 1988. 415 p.(rus)
8. Petuhov A.A. Sovershenstvovanie sposobа ustrojstva in"ektsionnykh svai v slabых glinistykh gruntakh dlya uslovii rekonstruktsii zdaniy: avtoref. dis. kand. tekhn. Nauk [Injection pile arrangement improvement in soft soils for building reconstruction. PhD abstract]. Tomsk : 2006. 23 p.(rus)
9. Shalginov R.V. Sovershenstvovanie metoda raschyota in"ekcionnykh svaj v glinistykh gruntah dlya fundamentov rekonstruiруemykh zdaniy: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk. – Tomsk, 2010. – 22 p.(rus)
10. Shamenkov Yu.M., Glazychev A.O. Raschet buronabivnykh svai v glinistykh gruntakh po dannym staticheskogo zondirovaniya [Bored pile design in clay soils using static penetration test]. *Osnovaniya i fundamenti, podzemnye sooruzheniya*, 2012. No. 3. Pp. 81–85. (rus)