

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСАДКИ БУРОИНЪЕКЦИОННЫХ СВАЙ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ УШИРЕНИЕМ

М.А. Самохвалов, Л.В. Гейдт, А.А. Паронко, А.В. Гейдт
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

В статье описана модернизированная конструкция буроинъекционной сваи, которая позволяет выполнять весь комплекс работ по усилению фундаментов реконструируемых зданий без ударных, механических и динамических воздействий. Предложен алгоритм расчета осадки буроинъекционных свай с контролируемым уширением, а также его сравнение с нормативными решениями и экспериментальными данными, полученными на строительной площадке в городе Тюмени. Представлен прогноз изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива под фундаментом здания при определении его осадки. Показано, что значение осадки главным образом зависит от расчётного сопротивления грунтового массива, модифицированного в процессе устройства буроинъекционной сваи, как по боковой поверхности, так и под нижним концом. Аналитические решения, приводимые в статье, позволяют более точно определять значение осадки с учетом изменения механических характеристик грунта и остаточных напряжений при формировании уплотненной зоны.

Ключевые слова: статические испытания, осадка, буроинъекционные сваи, пылевато-глинистые грунты.

1. Актуальность

На территории РФ расположено большое количество зданий и сооружений, фундаменты которых нуждаются в производстве работ по их усилению. Цель этих работ заключается в обеспечении возможности освоения подземного пространства согласно современным требованиям. Дополнительное подземное пространство, в свою очередь, может использоваться для размещения объектов инженерной и транспортной инфраструктуры. С технической точки зрения именно фундамент здания является главным элементом, отвечающим за жизнеспособность, долговечность и безопасную эксплуатацию зданий, поэтому разработка новых и модернизация существующих технологий для его усиления является актуальной темой исследований. Решение проблемы осложняется выполнени-

ем работ в стеснённых условиях центральной части сложившейся застройки городов, грунтовые условия которых представлены преимущественно слабыми пылевато-глинистыми грунтами. Поиск возможных решений показал, что наиболее приемлемыми способами являются щадящие технологии. Данные технологии позволяют выполнять весь комплекс работ без ударных, механических и динамических воздействий. Это является очень важным для объектов культурного наследия. Одним из представителей щадящих технологий является модернизированная конструкция буроинъекционной сваи, состоящая из металлической трубы, выполняющей роль иньектора, и контролируемого уширения на ее конце, формируемого в процессе нагнетания раствора (рис. 1). Результаты экспериментальных исследований данной конструкции

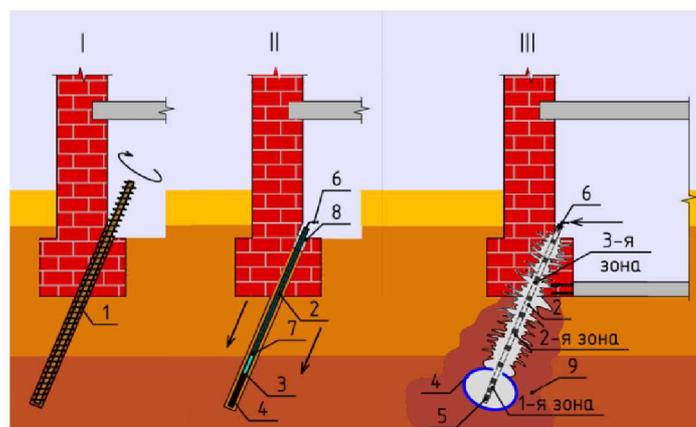


Рис. 1. Схема монтажа буроинъекционной сваи, имеющей контролируемое уширение:
I – выполнение скважины, II – монтаж трубы-иньектора с резиновой мембраной-стаканом,
III – иньекция раствора с образованием уплотненной зоны грунта

Основания и фундаменты, подземные сооружения

Физико-механические характеристики пылевато-глинистого грунта строительной площадки

Для грунта за пределами уширения								
z, м	$\gamma_{гр}$, кН/м ³	W, д. ед.	S _r , д. ед.	e, д. ед.	I _L , д. ед.	v	φ, град	c, кПа
2,9	19,2	0,31	0,90	0,74	0,64	0,32	17,0	21,8
G, МПа		E ^{ком} , МПа		E ^{ста} , МПа		E ₅₀ , МПа		K, МПа
4,9		2,4 (7,8)		2,9		6,1		12,8
Для грунта вокруг ствола свай								
z, м	$\gamma_{гр}$, кН/м ³	W, д. ед.	S _r , д. ед.	e, д. ед.	I _L , д. ед.	v	φ, град	c, кПа
0-2	17,8	0,18	0,65	0,81	0,16	0,31	18,0	26,1
2-3	19,1	0,3	0,91	0,76	0,63	0,34	17,1	21,3
G, МПа		E ^{компр} , МПа		E ^{стабил} , МПа		E ₅₀ , МПа		K, МПа
4,8		3,3 (18,7)		3,2		5,9		12,4
5,0		2,4 (7,8)		2,9		6,1		12,6

Примечание: в скобках указано значение модуля деформации грунта $E^{компр}$, откорректированное путем умножения на коэффициент $m_{осд}$, который принят согласно требованиям СП 22.13330.

сваи подробно представлены в работах [1, 2]. Для промышленного внедрения данной конструкции необходимо разработать алгоритм определения ее осадки в пылевато-глинистых грунтах.

2. Исходные данные для выполнения расчетов

На основании выполненных инженерно-геологических изысканий на строительной площадке в городе Тюмени, определены следующие физико-механические характеристики пылевато-глинистого грунта (см. таблицу).

3. Определение нелинейной осадки буронагнеточных свай при статическом нагружении

Для того чтобы оценить целесообразность использования буронагнеточных свай с контролируемым уширением на конце в глинистых грунтах при статическом нагружении необходимо научиться правильно прогнозировать изменение напряженно-деформированного состояния грунтового массива под фундаментом здания при определении его осадки. Значение осадки фундамента здания главным образом зависит от расчетного сопротивления грунтового массива, модифицированного в процессе устройства буронагнеточной сваи, как по боковой поверхности, так и под нижним концом.

3.1. Осадка уширения. Упругопластическая модель С.П. Тимошенко [3, 4] позволяет определить осадку, вызванную перемещением грунта в стороны от границы уплотненного ядра вокруг контролируемого уширения, радиусом $R_{упл}$, по формуле:

$$\begin{cases} \gamma(r) = \frac{\tau(r)}{G} \frac{\tau_1^*}{\tau^* - \tau(r)}; \\ \gamma(r) = -\frac{ds(r)}{dr}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\gamma(r)$ (м) – угловая деформация; G (кПа) – модуль сдвига грунта (п. 7.4.2 СП 24.13330 формула 2);

$\tau(r)$ (кПа) – касательные напряжения в грунтовом массиве от вдавливающей нагрузки N (формула 3); τ_1^* (кПа) – предельное значение касательных напряжений (формула 4);

$s(r)$ (м) – осадка уширения.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}, \quad (2)$$

где E (МПа) – модуль деформации грунта; ν – коэффициент поперечных деформаций грунта.

$$\tau(r) = \tau_{ul} \frac{(r_c + u_1)}{r}, \quad (3)$$

где τ_{ul} (кПа) – касательные напряжения, возникающие на границе контура уширения и грунтового массива (формула 5);

r_c – начальный радиус скважины, который принимается в зависимости от диаметра шнека буровой техники, $r_c = 0,04$ м;

u_1 – радиальное перемещение стенки мембраны-стакана, м.

$$\begin{aligned} \tau_1^* &= \gamma_{cR} R_{yш} = \\ &= \gamma_{cR} \left(\sigma_{r1}^{обж} \left(\frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} \right) + 2C_{yшп1} \left(\frac{\cos\phi}{1-\sin\phi} \right) \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\gamma_{cR} = 1,3$ – коэффициент условий работы грунтового массива под уширением (СП 24.13330); $R_{yш}$ – значение расчетного сопротивления грунта в зоне формирования контролируемого уширения;

$\sigma_{r1}^{обж}$ (кПа) – радиальные нормальные напряжения [5–7] (формула 6); ϕ и $C_{yшп1}$ – значение угла внутреннего трения и коэффициент удельного сцепления грунта в зоне формирования уширения. Данный параметр меняется в зависимости от изменения значения начального коэффициента пористости грунта $e_{yшп1}$ в процессе его уплотнения при формировании уширения (формула 7).

$$\tau_{ul} = \frac{N}{\pi(r_c + u_1)^2}, \quad (5)$$

$$\sigma_{r1}^{обж} = p_{кр1} + \sigma_{01}, \quad (6)$$

где $p_{кр1}$ (кПа) – критическое давление (формула 8);
 σ_{01} – горизонтальное боковое давление от собственного веса грунта (формула 9).

$$e_{уш1} = \frac{k_{w1} W_0 \rho_s}{S_r \rho_w}, \quad (7)$$

где k_{w1} – коэффициент, который учитывает изменение начальной влажности грунта (W_0) в уплотненной зоне ($R_{уш1}$); ρ_s (г/см³) – плотность частиц грунта; S_r (д. е.) – коэффициент водонасыщения; $\rho_w = 1$ г/см³ – плотность дистиллированной воды.

$$p_{кр1} = \frac{4(\sigma_0 \sin \varphi_0 + c \cos \varphi_0)}{(1-w-\sin \varphi_0)(3+w)}; \quad (8)$$

$$\sigma_{01} = \frac{(2\sigma_h + \sigma_z)}{3} = \frac{2\left(\gamma_{гр} z \frac{v}{1-v}\right) + \gamma_{гр} z}{3}. \quad (9)$$

Таким образом, выражение, позволяющее определить осадку уширения, будет иметь следующий вид:

$$s_1 = \frac{N}{\pi G(r_c + u_1)} \times \ln \frac{\left(\frac{\tau^*}{(r_c + u_1)} R_{уш1} - \frac{N}{\pi(r_c + u_1)^2}\right)}{\left(\tau^* - \frac{N}{\pi(r_c + u_1)^2}\right)}. \quad (10)$$

На рис. 2 представлены графики $s = f(p)$, полученные по экспериментальным значениям, расчётным и нормативным.

Как видно из графиков на рис. 2, наибольшую сходимость с экспериментальными значениями имеет линия № 3. Отличие линии зависимости $s = f(p)$ № 3 от № 2 заключается в изменении сла-

гаемых (характеризующих напряжённо-деформированное состояние уплотненного грунтового массива в пределах сформированного уширения) в формуле (10):

$$s_1 = \frac{N}{\pi G_{уш1}(r_c + u_1)} \times \ln \frac{\left(\frac{\tau_{уш1}^*}{(r_c + u_1)} R_{уш1} - \frac{N}{\pi(r_c + u_1)^2}\right)}{\left(\tau^* - \frac{N}{\pi(r_c + u_1)^2}\right)}. \quad (11)$$

1. G меняется на $G_{уш1}$ (формула 2) с изменением значения модуля деформации $E_{уш1}$, который может быть определен по известным методикам [8–15];

2. τ^*_1 меняется на $\tau^*_{уш1}$ (формула 4) с изменением значения радиальных напряжений и учетом остаточных внутренних напряжений, сохраняющихся в грунтовой массе после формирования контролируемого уширения на конце сваи [16–18]:

$$\tau^*_{уш1} = \gamma_{сR} \left(\left(\sigma_r^{обж} + \sigma_r^{ост} \right) \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) + 2C_{уш1} \left(\frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \right). \quad (12)$$

Осадка уширения с учётом нормативных требований определяется в соответствии с п. 7.4.2 СП 24.13330:

$$s_{уш} = \frac{0,22N}{G_{уш1} 2(r_c + u_1)}. \quad (13)$$

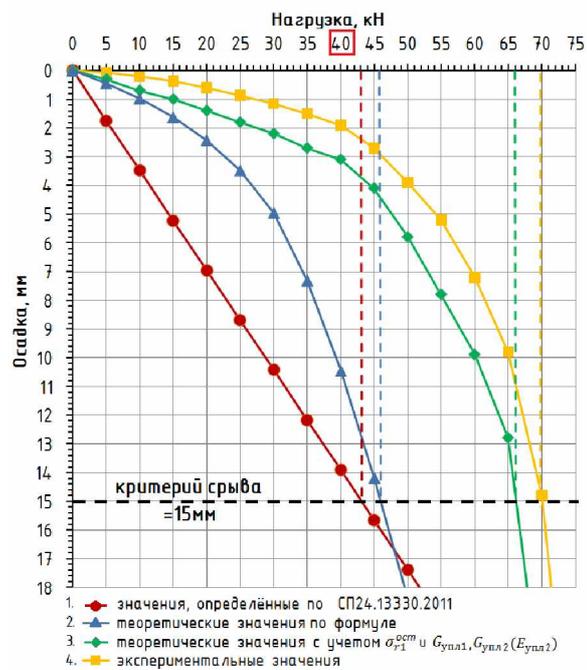
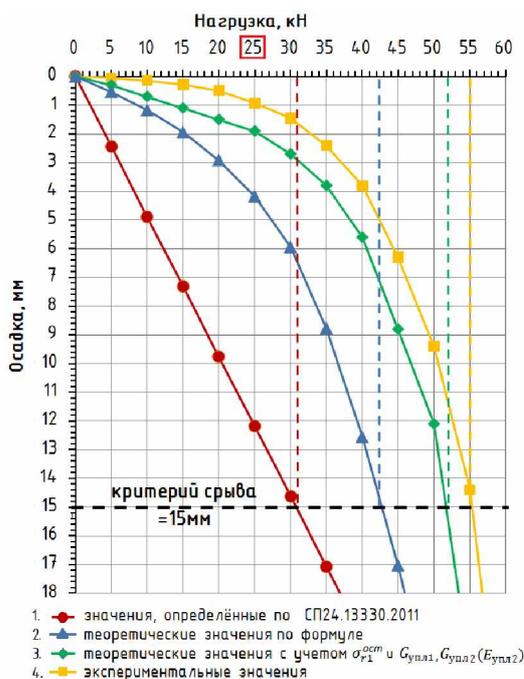


Рис. 2. Графики зависимости $s = f(p)$ для свай: а – с объемом уширения 30 л; б – с объемом уширения 40 л

3.2. Осадка ствола сваи

Выражение для определения осадки ствола сваи (без влияния контролируемого уширения на конце сваи и гидравлических разрывов по её стволу) при $r = (r_c + u_2)$:

$$s = \frac{\tau_{u2}(r_c + u_2)}{G} \ln \frac{\left(\frac{f_{бок}}{(r_c + u_2)} R_{упл2} - \tau_{u2} \right)}{(\tau_2^* - \tau_{u2})}, \quad (14)$$

где u_2 (м) – радиальное смещение внутренней поверхности скважины при формировании ствола сваи, (формулы 15–16); $R_{упл2}$ (м) – радиус зоны уплотнения грунта по стволу сваи (формула 17); $f_{бок}$ (кПа) – расчётное значение сопротивления грунта по боковой поверхности ствола сваи (формула 18); τ_{u2} – касательные напряжения от вдавливающей нагрузки (формула 19).

$$u_2 = (p_{ин2} - \sigma_0)(A_{21} + A_{22}(1+w)) \frac{1}{E}; \quad (15)$$

$$u_2 = \frac{1}{E} A p_{кр2} k_{r2}^\beta + \frac{1}{E} M \frac{1 - k_{r2}^{1-\alpha+\beta}}{1+\beta-\alpha} - \frac{1}{E} N \frac{1 - k_{r2}^{1+\beta}}{1+\beta}; \quad (16)$$

$$R_{упл2} = (r_c + u_2) k_{r2}; \quad (17)$$

$$\tau_2^* = f_{бок} \gamma_{cf} = \gamma_{cf} (\sigma_{r2}^{обж} \operatorname{tg} \varphi + C_{упл}), \quad (18)$$

где γ_{cf} – коэффициент условий работы ($\gamma_{cf} = 0,7$ п. 7.6 СП 24.13330); $\sigma_{r2}^{обж}$ (кПа) – радиальное обжатие грунтового массива [19–23] (формула 22); $C_{упл2}$ (кПа) – удельное сцепление, определяемое путем подстановки значения коэффициента пористости уплотненного грунта по боковой поверхности ствола сваи $e_{упл2}$, и коэффициента $k_{w2} = 0,8$, в зависимости от уменьшения влажности (в среднем на 20 %) околосвайного грунта;

$$\tau_{u2} = \frac{N}{2\pi(r_c + u_2)l}, \quad (19)$$

где l – длина буроинъекционной сваи, м.

$$\sigma_{r2}^{обж} = p_{кр2} + \sigma_{02}, \quad (20)$$

где $p_{кр2}$ (кПа) – критическое давление на внутреннюю поверхность стенки скважины (формула 21); σ_{02} – боковое давление грунта (формула 22).

$$p_{кр} = \frac{-2(\sigma_0 \sin \varphi_0 + c \cos \varphi_0)}{(w+2) \sin \varphi + w}; \quad (21)$$

$$\sigma_{02} = \gamma_{гр} z v / (1-v). \quad (22)$$

В итоге, подставляя в формулу (14) значение τ_{u2} из формулы (19), получаем:

$$s = \frac{N}{2\pi l G} \ln \frac{\left(\frac{\tau_2^*}{(r_c + u_2)} R_{упл2} - \frac{N}{2\pi(r_c + u_2)l} \right)}{\left(\tau_2^* - \frac{N}{2\pi(r_c + u_2)l} \right)}. \quad (23)$$

Осадка ствола сваи с учётом нормативных требований определяется в соответствии с п. 7.4.2 и приложение Д СП 24.13330:

$$s_1 = 0,17 \ln \left(\frac{k_v G_1 l}{G_2 d} \right) \left(\frac{k_v G_1 l}{G_2 d} \right) \frac{N}{G_1 l}, \quad (24)$$

где G_1 (кПа) – модуль сдвига грунта в зоне уширения, G_2 (кПа) – модуль сдвига грунта по стволу сваи; k_v – коэффициент:

$$k_v = 2,82 - 3,78v + 2,18v^2. \quad (25)$$

На рис. 3 показано сравнение значений осадки сваи по предлагаемой методике и нормативным требованиям.

3.3. Определение осадки буроинъекционных свай

Объединив выражения (10) и (23), сможем получить формулу для определения осадки:

$$s = \frac{N}{\pi(r_c + u_1)G_1 + 2\pi l G_2} \times \ln \frac{\left(\tau^* \left(\frac{R_{упл1}}{r_c + u_1} + \frac{R_{упл2}}{r_c + u_2} \right) - \tau_u \right)}{(\tau^* - \tau_u)}, \quad (26)$$

$$\text{где } \tau_u = \frac{N}{\pi(r_c + u_1)^2 + 2\pi l(r_c + u_2)}; \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \tau^* &= \tau_{упл1}^* + \tau_2 = \\ &= \gamma_{cR} \left((\sigma_r^{обж} + \sigma_r^{ост}) \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) + 2C_{упл} \left(\frac{\cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \right) \right) + \\ &+ \gamma_{cf} (\sigma_{r2}^{обж} \operatorname{tg} \varphi + C_{упл}). \end{aligned} \quad (28)$$

Осадка буроинъекционной сваи может быть определена по требованиям нормативных документов (п. 7.4.2 и приложение Д СП 24.13330):

$$s_c = \frac{N}{G_2 l} 0,17 \ln \frac{k_v G_2 l}{G_1 d}. \quad (29)$$

Сравнение значений осадки представлено на рис. 3.

Вывод

По результатам численных расчетов, проводимых по формуле (26), а также по методике, изложенной в СП 24.13330, можно с существенным запасом определить осадку буроинъекционной сваи с контролируемым уширением. Для того чтобы более точно определить значение осадки по формуле (26), требуется учитывать следующие параметры: остаточные напряжения и изменение механических характеристик при формировании уплотненной зоны грунта.

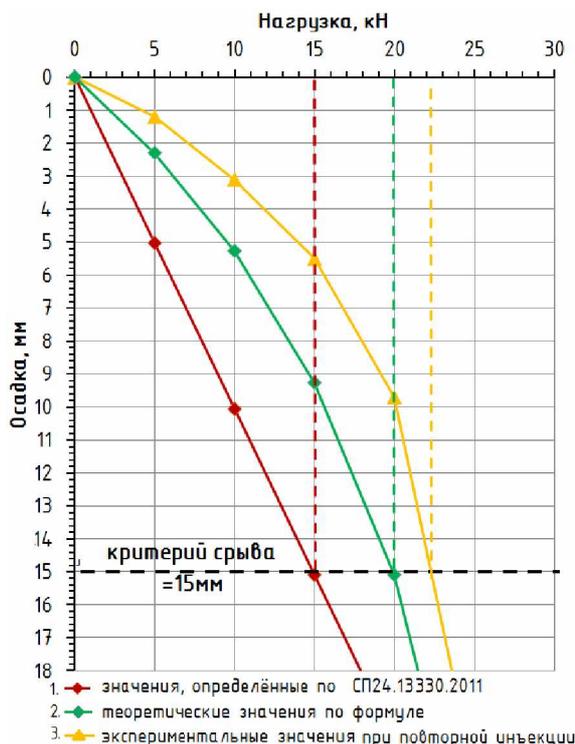


Рис. 3. Сравнение графиков зависимости осадки от нагрузки буринъекционных свай без уширения

Литература

1. Samokhvalov, M.A. Results of the calculated prediction for interaction of drilling-injection piles, having controlled broadening, with dust-clay ground basis / M.A. Samokhvalov, A.V. Geidt, A.A. Paronko // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. – 2018. – № 9 (7). – pp. 484–496.

2. Samokhvalov, M.A. Results of a study of stress-strain state of the soil massive around the resulting broadening at the end drill-injection pile / M.A. Samokhvalov, Yu.V. Zazulya, M.D. Kajgorodov // *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. – 2017. – № 4 (36). – P. 50–57.

3. Ибрагимов, М.Н. Вопросы проектирования и производства уплотнения грунтов инъекцией растворов по гидроразрывной технологии / М.Н. Ибрагимов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2015. – № 2. – С. 22–27.

4. Гейдт, В.Д. Лабораторные исследования скорости консолидации грунта при устройстве песчаных дрен: на примере Западной Сибири / В.Д. Гейдт, Л.В. Гейдт // *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. – 2018. – № 1(36). – С. 67–71.

5. Ланис, А.Л. Результаты моделирования эксплуатируемых насыпей при напорном инъецировании твердеющих растворов / А.Л. Ланис // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. – 2018. – № 3 (46). – С. 43–50.

6. Ланис, А.Л. Способ усиления земляного полотна методом напорной инъекции / А.Л. Ланис // *Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения*. – 2010. – № 23. – С. 75–77.

7. Оржиховский, Ю.Р. Инъекционное закрепление просадочных грунтов (метод контурной обоймы) / Ю.Р. Оржиховский, В.В. Лушников, Р.Я. Оржиховская // *Академический вестник УралНИИпроект РААСН*. – 2013. – № 3. – С. 78–81.

8. Мангушев, Р.А. Анализ практического применения завинчиваемых набивных свай / Р.А. Мангушев, В.В. Конюшков, И.П. Дьяконов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2014. – № 5. – С. 11–16.

9. Упрочнение оснований зданий и сооружений методом гидроразрыва с использованием манжетной технологии / Е.С. Вознесенская [и др.] // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2014. – № 6. – С. 19–24.

10. Полищук, А.И. Способы усиления фундаментов и строительных конструкций цокольной части реконструируемых, восстанавливаемых зданий / А.И. Полищук, А.А. Петухов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2018. – Т. 9. – № 1. – С. 42–51.

11. Полищук, А.И. Оценка несущей способности инъекционных свай в слабых глинистых грунтах для фундаментов реконструируемых зданий / А.И. Полищук, А.А. Тарасов // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. – 2017. – № 1. – С. 21–26.

12. Петухов, А.А. Усиление фундаментов реконструируемых зданий в г. Томске с использованием инъекционных свай / А.А. Петухов, А.И. Полищук // Межвузовский тематический сборник трудов «Научно-практические и теоретические проблемы Геотехники». – СПб.: СПбГАСУ, 2008. – С. 435–440.

13. Конюшков, В.В. Исследование несущей способности буронабивных свай с учетом технологии их изготовления / В.В. Конюшков, В.М. Улицкий // Известия Орловского государственного технического университета. Серия: Строительство и транспорт. – 2007. – № 2–14. – С. 68–74.

14. Богданова, Е.О. Компьютерное моделирование развития осадок здания на основании, усиленном вертикальным армированием / Е.О. Богданова, В.И. Клевко // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2017. – № 4 (35). – С. 73–77.

15. Готман, Н.З. Определение модуля деформации закрепленного цементацией грунта / Н.З. Готман, А.Л. Готман // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 1 (39). – С. 138–144.

16. Полищук, А.И. Инженерный метод расчета осадки винтовой двухлопастной сваи в глинистом грунте / А.И. Полищук, Ф.А. Максимов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2017. – № 6. – С. 9–14.

17. Тер-Мартirosян, З.Г. Учет расширения грунтовых свай при работе в составе фундамента / З.Г. Тер-Мартirosян, В.В. Сидоров // Инте-

грация, партнерство и инновации в строительной науке и образовании. – М., 2017. – С. 974–978.

18. Бахолдин, Б.В. Обобщение результатов экспериментальных исследований и предложения по расчету свай на горизонтальные нагрузки с учетом их гибкости / Б.В. Бахолдин, Е.В. Труфанова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 31-2 (50). – С. 227–232.

19. Прогнозирование деформаций оснований окружающей застройки с учетом технологической осадки / В.А. Ильичев, Р.А. Мангушев, Н.С. Никифорова, А.В. Коннов // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2017. – № 6 (994). – С. 68–69.

20. Шашкин, А.Г. Влияние буронабивных свай замещения на деформации водонасыщенных глинистых грунтов / А.Г. Шашкин, А.А. Шацкий // Промышленное и гражданское строительство. – 2017. – № 12. – С. 15–22.

21. Конюшков, В.В. Оценка несущей способности буронабивных свай / В.В. Конюшков, В.М. Улицкий // Вестник гражданских инженеров. – 2007. – № 2 (11). – С. 52–57.

22. Улицкий, В.М. Несущая способность буронабивных свай при различных технологиях изготовления / В.М. Улицкий, В.В. Конюшков // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2007. – № 3 (12). – С. 193–215.

23. Generation of stress-strain state in combined strip pile foundation beds through pressing of soil / M.A. Stepanov, R.V. Melnikov, J.V. Zazulya, O.V. Ashihmin // MATEC Web of Conferences. – 2017. – № 02011. – P. 1–8.

Самохвалов Михаил Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры геотехники, Тюменский индустриальный университет (Тюмень), 89199431379@yandex.ru

Гейдт Лариса Викторовна, старший преподаватель кафедры геотехники, Тюменский индустриальный университет (Тюмень), gejdtlv@tyuiu.ru

Паронко Александр Александрович, магистрант кафедры геотехники, Тюменский индустриальный университет (Тюмень), alexparonko@gmail.com

Гейдт Андрей Владимирович, магистрант кафедры геотехники, Тюменский индустриальный университет (Тюмень), andrejgeydt@gmail.com

Поступила в редакцию 29 ноября 2018 г.

DETERMINATION OF SUBSIDENCE OF DRILL-INJECTION PILES WITH CONTROLLED BROADENING

M.A. Samokhvalov, 89199431379@yandex.ru

L.V. Geidt, gejdtlv@tyuiu.ru

A.A. Paronko, alexparonko@gmail.com

A.V. Geidt, andrejgeydt@gmail.com

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

The article describes a modernized design of a drill-injection pile, which allows to perform the whole complex of works on strengthening the foundations of reconstructed buildings without impact, mechanical and dynamic effects. An algorithm is proposed for calculating the subsidence of drill-injection piles with controlled broadening, as well as its comparison with regulatory solutions and experimental data obtained at a construction site in the city of Tyumen. The forecast is given on the changes in the stress-strain state of the soil mass under the building foundation when determining its subsidence. It is shown that the value of subsidence mainly depends on the calculated resistance of the soil mass modified in the process of setting up the drill-injection pile, both on the lateral surface and under the lower end. The analytical solutions presented in the article allow us to more accurately determine the subsidence value, taking into account the changes in mechanical characteristics of soil and residual stresses during the formation of the compacted zone.

Keywords: static tests, subsidence, drill-injection piles, soft silty-clayey soils.

References

1. Samokhvalov M.A., Geidt A.V., Paronko A.A. [Results of the Calculated Prediction for Interaction of Drilling-Injection Piles, Having Controlled Broadening, with Dust-Clay Ground Basis]. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 2018, no. 9 (7), pp. 484–496.
2. Samokhvalov M.A., Zazulya Yu.V., Kajgorodov M.D. [Results of a Study of Stress-Strain State of the Soil Massive Around the Resulting Broadening at the End Drill-Injection Pile]. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*, 2017, no. 4 (36), pp. 50–57.
3. Ibragimov M.N. [Issues of Design and Production of Soil Compaction by Injection of Solutions Using Hydraulic Fracturing Technology]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Foundations, Bases and Soil Mechanics], 2015, no. 2, pp. 22–27. (in Russ.). DOI: 10.1007/BF01704580
4. Geidt V.D., Geidt L.V. [Laboratory Researches of Speed of Consolidation of Soil at the Device of Sandy Drains: on the Example of Western Siberia]. *Akademicheskij vestnik UralNIIProyekt RAASN* [Academic Bulletin Uralniiprojekt RAASN], 2018, no. 1(36), pp. 67–71. (in Russ.).
5. Lanis A.L. [The Simulation Results of Exploited Embankments with Pressure Injection of Hardening Solutions]. *The Siberian Transport University Bulletin*, 2018, no. 3 (46), pp. 43–50. (in Russ.).
6. Lanis A.L. [The Way to Strengthen the Subgrade by Pressure Injection]. *The Siberian Transport University Bulletin*, 2010, no. 23, pp. 75–77. (in Russ.).
7. Orzhekhovskiy Yu.R., Lushnikov V.V., Orzhekhovskaya R.Ya. [Injection Consolidation of Subsiding Soils (Contour Cage Method)]. *Akademicheskij vestnik UralNIIProyekt RAASN* [Academic Bulletin Uralniiprojekt RAASN], 2013, no. 3, pp. 78–81. (in Russ.).
8. Mangushev R.A., Konyushkov V.V., D'yakonov I.P. [Analysis of the Practical Application of Screwed Pile]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Foundations, Bases and Soil Mechanics], 2014, no. 5, pp. 11–16. (in Russ.). DOI: 10.1007/s11204-014-9281-9
9. Voznesenskaya E.S. [Strengthening of the Bases of Buildings and Constructions by Method of Hydraulic Fracturing Using Cuff Technology]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Foundations, Bases and Soil Mechanics], 2014, no. 6, pp. 19–24. (in Russ.).
10. Polishchuk A.I., Petukhov A.A. [Ways to Strengthen the Foundations and Building Structures of the Basement of the Reconstructed, Restored Buildings]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Construction and architecture], 2018, vol. 9, no. 1, pp. 42–51. (in Russ.).
11. Polishchuk A.I., Tarasov A.A. [Estimation of the Carrying Capacity of Injection Piles in Weak Clay Soils for the Foundations of Reconstructed Buildings]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Foundations, Bases and Soil Mechanics], 2017, no. 1, pp. 21–26. (in Russ.). DOI: 10.1007/s11204-017-9430-z

12. Petukhov A.A., Polishchuk A.I. [Strengthening the Foundations of Reconstructed Buildings in the City of Tomsk Using Injection Piles]. *Mezhvuzovskiy tematicheskiy sbornik trudov «Nauchno-prakticheskiye i teoreticheskiye problemy Geotekhniki»* [Interuniversity Thematic Collection of Works "Scientific-Practical and Theoretical Problems of Geotechnics"]. Sankt-Petersburg, SPbGASU Publ., 2008, pp. 435–440. (in Russ.).
13. Konyushkov V.V., Ulitskiy V.M. [Investigation of the Bearing Capacity of Injection Piles Taking into Account their Manufacturing Technology]. *Izvestiya Orlovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i transport* [Proceedings of the Oryol State Technical University. Series: Construction and Transport], 2007, no. 2–14, pp. 68–74. (in Russ.).
14. Bogdanova E.O., Kleveko V.I. [Computer Simulation of Building Sediment Development on the Basis of Strengthening Vertical Reinforcement]. *Akademicheskii vestnik UralNIIProyekt RAASN* [Academic Bulletin Uralniiprojekt RAASN], 2017, no. 4 (35), pp. 73–77. (in Russ.).
15. Gotman N.Z., Gotman A.L. [Determination of the Modulus of Deformation of a Soil Fixed by Cementation]. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [News of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering], 2017, no. 1 (39), pp. 138–144. (in Russ.).
16. Polishchuk A.I. [Engineering Method of Calculating the Precipitation of a Screw Two-Blade Pile in Clay Soil]. *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov* [Foundations, Bases and Soil Mechanics], 2017, no. 6, pp. 9–14. (in Russ.).
17. Ter-Martirosyan Z.G., Sidorov V.V. [Accounting for the Expansion of Soil Piles when Working as Part of the Foundation]. *Integratsiya, partnerstvo i innovatsii v stroitel'noy nauke i obrazovanii* [Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education], 2017, pp. 974–978. (in Russ.).
18. Bakholdin B.V., Trufanova E.V. [Generalization of the Results of Experimental Studies and Proposals for the Calculation of Piles on Horizontal Loads, Taking into Account their Flexibility]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Building and Architecture], 2013, no. 31-2 (50), pp. 227–232. (in Russ.).
19. Il'ichev V.A., Mangushev R.A., Nikiforova N.S., Konnov A.V. [Prediction of Base Deformations of the Surrounding Buildings, Taking into Account Technological Precipitation]. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki* [BSU: Bulletin of Construction Equipment], 2017, no. 6 (994), pp. 68–69. (in Russ.).
20. Shashkin A.G., Shatskiy A.A. [Influence of Bored Replacement Piles on the Deformation of Water-Saturated Clay Soils]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2017, no. 12, pp. 15–22. (in Russ.).
21. Konyushkov V.V., Ulitskiy V.M. [Estimation of Bearing Capacity of Injection Piles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Civil Engineering Bulletin], 2007, no. 2 (11), pp. 52–57. (in Russ.).
22. Ulitskiy V.M., Konyushkov V.V. [Bearing Capacity of Brown Injection Piles with Various Manufacturing Techniques]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [News of the Petersburg University of Communications], 2007, no. 3 (12), pp. 193–215. (in Russ.).
23. Stepanov M.A., Melnikov R.V., Zazulya J.V., Ashihmin O.V. [Generation of Stress-Strain State in Combined Strip Pile Foundation Beds through Pressing of Soil]. *MATEC Web of Conferences*, 2017, no. 02011, pp. 1–8. DOI: 10.1051/mateconf/201710602011

Received 29 November 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Определение осадки буроинъекционных свай с контролируемым уширением / М.А. Самохвалов, Л.В. Гейдт, А.А. Паронко, А.В. Гейдт // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 27–34. DOI: 10.14529/build190104

FOR CITATION

Samokhvalov M.A., Geidt L.V., Paronko A.A., Geidt A.V. Determination of Subsidence of Drill-Injection Piles with Controlled Broadening. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture*. 2019, vol. 19, no. 1, pp. 27–34. (in Russ.). DOI: 10.14529/build190104