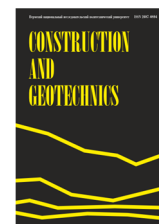




CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 16, № 3, 2025

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2025.3.03

УДК 624.154:624.042

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УПЛОТНЕННОЙ ЗОНЫ ОКОЛОСВАЙНОГО ГРУНТА

А.Л. Готман^{1,2}, Н.З. Готман^{1,2}

¹НИИОСП им. Н.М.Герсеевича НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация

²Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 07 июля 2024
Одобрена: 22 января 2025
Принята к публикации:
10 сентября 2025

Ключевые слова:

пирамидальная свая, физические характеристики, зона уплотнения, радиус уплотнения, выпор грунта, параметры уплотнения.

АННОТАЦИЯ

Рассматривается задача определения размеров уплотненной зоны грунтового основания вокруг свай различной формы ствола (призматической, полый-круглой, пирамидальной), погружаемых в грунт путем забивки молотом сваепогружающего копра. На основе анализа изменения физических характеристик околосвайного грунта после забивки свай в грунт разработан метод расчета уплотненной зоны околосвайного грунта с учетом и без учета возможного выпора грунта при различной степени водонасыщения грунта, включая полностью водонасыщенный грунт. Результаты расчетов по данной методике сопоставлены с экспериментальными данными, полученными на примере пирамидальной сваи, которая после забивки в грунт была откопана, отобраны образцы грунта в околосвайной зоне и определены их физические характеристики. Погрешность метода расчета не превысила 10 %.

© Готман Альфред Леонидович – доктор технических наук, главный специалист, профессор, e-mail: gotmans@mail.ru.

Готман Наталья Залмановна – доктор технических наук, главный специалист, профессор, e-mail: natalya.gotman@marksgroup.ru.

Alfred L. Gotman – Doctor of Technical Sciences, Chief Specialist, Professor, e-mail: gotmans@mail.ru.

Natalia Z. Gotman – Doctor of Technical Sciences, Chief Specialist, Professor, e-mail: natalya.gotman@marksgroup.ru.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

CALCULATION OF THE PARAMETERS OF THE COMPACTED ZONE OF THE NEAR-PILE SOIL

A.L. Gotman^{1,2}, N.Z. Gotman^{1,2}

¹Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures, Moscow, Russian Federation

²Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Received: 07 July 2024 Approved: 22 January 2025 Accepted for publication: 10 September 2025	The article considers the problem of determining the dimensions of the compacted zone of the soil foundation around piles of various shaft shapes (prismatic, hollow-round, pyramidal), driven into the ground by driving a pile driver hammer. Based on the analysis of changes in the physical characteristics of the near-pile soil after driving the pile into the ground, a method for calculating the compacted zone of the near-pile soil has been developed with and without taking into account possible soil uplift at different degrees of soil water saturation, including completely water-saturated soil. The calculation results using this method have been compared with experimental data obtained using the example of a pyramidal pile, which was dug out after driving into the ground, soil samples were taken in the near-pile zone, and their physical characteristics were determined. The error of the calculation method did not exceed 10 %.
Keywords: pyramidal pile, physical characteristics, compaction zone, compaction radius, soil uplift, compaction parameter.	

Введение

При оценке работы забивных свай в грунте большое значение имеет поведение и состояние грунта вокруг свай [1–5].

Из опубликованных в научной литературе результатов исследований забивных свай следует, что при забивке свай в грунт последний вытесняется и перемещается в области наименьшего сопротивления. В зависимости от свойств и состояния грунта, размеров и формы ствола свай такие области образуются вокруг ствола свай и ниже ее острия. При этом происходит уплотнение грунта до некоторой критической плотности с последующим вытеснением (выпором) его на поверхность. Таким образом, часть грунта, вытесненного свай при ее забивке, расходуется на уплотнение, часть – на выпор.

Задача определения объема и радиуса зоны уплотнения около свайного грунта имеет особое значение для практических целей.

Забивные призматические свай. При проектировании свайно-плитных фундаментов из забивных призматических свай учет уплотнения межсвайного грунта при забивке свай позволяет увеличить несущую способность свай по грунту и при увеличении шага свай существенно сократить их количество.

С целью оценки влияния уплотнения межсвайного грунта и грунта в основании свайного поля на поведение свай при их нагружении выполнены экспериментальные исследования, которые включали в себя статическое зондирование до и после погружения свай в поле, а также статическое испытание одиночной свай и свай в составе свайного поля, испытанной как одиночная.

Основание экспериментальной площадки представлено тугопластичными суглинками на всю длину свай, характеристики которых приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики грунтов экспериментальной площадки

Table 1

Physico-mechanical characteristics of the experimental site soils

№ инженерно-геологических элементов	Глубина залегания подошвы элемента, м	γ , кН/м ³	E , МПа	ν	ϕ , град.	C , МПа
1	0,6	19	10	0,35	19	26
2	4,5	19,4	8	0,35	22	14
3	12,2	19,9	11	0,35	23	25

Результаты статического зондирования грунтов на экспериментальной площадке на глубину 14 м представлены на рис. 1. На графике изменения удельного сопротивления под наконечником зонда (q) с изменением глубины погружения зонда (h) показаны две кривые: 1 – до забивки свай, 2 – после забивки свай длиной 12 м с шагом 1,2 м. Сравнение этих кривых показывает, что после забивки свай в поле удельное сопротивление (q) увеличивается в среднем в 1,5 раза (причем в межсвайном грунте), возрастание величин q составляет 25–50 %. Результаты статических испытаний одиночных свай длиной 12 м, сечением 30×30 см, испытанных как отдельно стоящая и в составе свайного поля (когда остальные сваи не нагружены), представлены на рис. 2. Результаты статических испытаний свай представлены в виде графиков «нагрузка – осадка»: 1 – для одиночной сваи; 2 – для сваи в составе свайного поля, испытанной как одиночная. Анализ кривых 1 и 2 на графике «нагрузка – осадка» позволяет заключить, что нагрузка, соответствующая моменту полной реализации сил трения по боковой поверхности сваи, полученная при испытании одиночной сваи, в 1,6 раза меньше той же нагрузки по испытаниям сваи в поле.

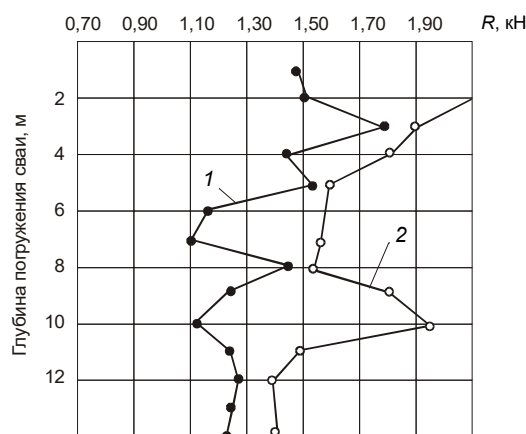


Рис. 1. График изменения удельного сопротивления грунта под наконечником зонда q ; 1 – до забивки свай; 2 – после забивки свай

Fig. 1. Graph of changes in the resistivity of the soil under the tip of the probe q ; 1 – before driving the pile; 2 – after driving the pile

Из результатов экспериментальных и теоретических исследований свай, в том числе и в составе группы свай [6–8], известно, что величина нагрузки, соответствующая полной сдвиговой осадке (точка «а» на графике, см. рис. 2) в большей степени определяется сопротивлением грунта по боковой поверхности сваи, что подтверждает факт уплотнения

межсвайного грунта и повышения его прочностных и деформационных характеристик. При этом большое значение имеет шаг свай: если шаг свай менее «эффективного» радиуса зоны уплотнения околосвайного грунта, в пределах которого коэффициент пористости снижается более чем на 30 %. Исследования, целью которых является определение радиуса зоны уплотнения околосвайного грунта вокруг забивной сваи, позволят выбрать оптимальный шаг свай, обеспечивающий эксплуатационную надежность фундамента.

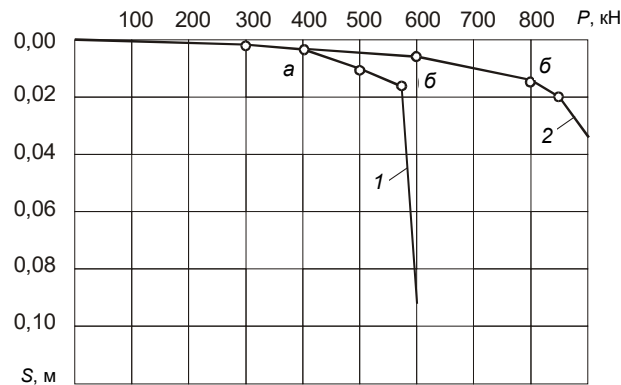


Рис. 2. Графики «нагрузка – осадка» одиночной сваи (по испытанию) (1) и сваи в свайном поле, испытанной как одиночной (2)

Fig. 2. Load-draft graphs of a single pile (according to the test) (1) and a pile in a pile field tested as a single pile (2)

Пирамидальные сваи. Для свай пирамидальной (конической) формы наклонные грани боковой поверхности способствуют значительному уплотнению околосвайного грунта, что существенно влияет на формирование сопротивления грунта вертикальной и горизонтальной нагрузкам.

Такому подходу и расчету пирамидальных свай по грунту посвящено большое количество исследований Одесской школы геотехников, основоположником которой был В.Н. Голубков [9; 10], а также ряд других исследователей [11; 12]. Кроме того, решение этой задачи позволит при проектировании определить минимальное расстояние между сваями, исключая их взаимовлияние как для свай сплошного сечения, так и для полых круглых свай.

Для пирамидальных набивных свай знание объема уплотненной зоны позволяет установить минимально допустимое расстояние между забиваемым штампом-скважинообразователем и существующей скважиной из условия обеспечения сохранности последней.

Упрощенно задача определения зоны уплотнения грунта была решена В.И. Голубковым [9]. В этом решении не учитывался возможный выпор грунта и наличие воды в порах, т.е. принято, что весь вытесняемый свайей грунт идет на уплотнение. Такое решение может дать удовлетворительный результат в просадочных грунтах и в маловлажных песчаных грунтах. В водонасыщенных глинистых грунтах поведение массива грунта под нагрузкой существенно отличается, поэтому для решения задачи целесообразно получение более универсального решения.

Решение задачи

Примем следующие предпосылки.

1. При забивке вокруг сваи образуется некоторая область уплотненного грунта объемом V_y , а часть грунта объемом V_v выпирается на поверхность. Для полых круглых свай,

погружаемых с открытым нижним концом, часть грунта объемом V_y расходуется на образование грунтового ядра в полости сваи.

2. Грунт в пределах зоны уплотнения уплотняется до некоторой величины $\rho_{d,y}^p$, постоянной в пределах этой зоны.

3. Поровая вода в глинистом грунте при мгновенном действии ударной нагрузки при забивке сваи не успевает отжаться из пор.

Исходя из принятых предпосылок, рассмотрим три состояния глинистой грунтовой массы, в которую забивается свая:

1. Грунт полностью водонасыщен, степень влажности $S_r=1$. В этом случае, поскольку нагрузка на грунтовую массу при забивке сваи передается практически мгновенно, уплотнения грунта не происходит, т.е.

$$V_y = 0, \quad (1)$$

а объем выпирания грунта равен объему забитой части сваи

$$V_B = V_{св} \quad (2)$$

2. Грунт маловлажный. Рассмотрим два состояния грунтового массива в пределах зоны уплотнения: до забивки сваи и после ее забивки.

Известно [13], что объем пор в единице объема грунта равен

$$n = \frac{e}{1+e}, \quad (3)$$

где e – коэффициент пористости.

Следовательно, объем пор $V'_{пор}$ в пределах зоны уплотнения до забивки сваи равен

$$V'_{пор} = V_y \frac{e}{1+e}. \quad (4)$$

Учитывая, что коэффициент пористости e связан с объемной массой скелета грунта ρ_d выражением

$$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}, \quad (5)$$

выражение (4) запишется в виде

$$V'_{пор} = V_y \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}, \quad (6)$$

где ρ_s – удельная масса твердых частиц грунта.

После забивки сваи объем пор в грунте в пределах зоны уплотнения уменьшился на величину объема сваи $V_{св}$. Кроме того, произошел выпор части грунта объемом V_B на поверхность, что увеличило объем пор в зоне уплотнения на величину объема твердых частиц $V_{B,T}$, находящегося в объеме V_B , равного

$$V_{B,T} = V_B \frac{\rho_d}{\rho_s}. \quad (7)$$

Исходя из этого, можно записать:

$$V_{\text{пор}}^{II} = V_y \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} + V_B \frac{\rho_d}{\rho_s} - V_{\text{CB}}, \quad (8)$$

где $V_{\text{пор}}^{II}$ – объем пор в пределах зоны уплотнения после забивки свай с учетом выпора некоторой части грунта на поверхность.

Вместе с тем, учитывая, что после забивки свай объемная масса скелета в пределах зоны уплотнения увеличилась до величины $\rho_{d,y}$, можно записать:

$$V_{\text{пор}}^{II} = (V_y - V_{\text{CB}}) \left(\frac{\rho_s - \rho_{d,y}}{\rho_s} \right). \quad (9)$$

Приравняв правые части выражений (8) и (9) и решая полученное уравнение относительно V_y , имеем:

$$V_y = \frac{V_{\text{CB}} \rho_{d,y} - V_B \rho_d}{\rho_{d,y} - \rho_d}. \quad (10)$$

Для свай-оболочки, забиваемой в грунт с открытым нижним концом, выражение для определения объема зоны уплотнения будет иметь вид:

$$V_y = \frac{V_{\text{CB}} \rho_{d,y} - \rho_d (V_B + V_{\text{я}})}{\rho_{d,y} - \rho_d}, \quad (11)$$

где $V_{\text{я}}$ – объем грунта в полости свай-оболочки.

При выводе формулы (11) было принято, что влажность грунта естественной структуры W меньше влажности, при которой грунт, уплотненный до $\rho_d = \rho_{d,y}$, стал бы полностью водонасыщенным. Критерием предела уплотнения такого грунта является не влажность, а способность грунта уплотняться, т.е. их структурная деформируемость. Для таких грунтов величину $\rho_{d,y}$ следует определять экспериментально.

3. Глинистый грунт водонасыщен, но степень влажности $S_r < 1$. В таком случае околосвайный грунт будет уплотняться при забивке свай до состояния, когда объем пор в грунте станет равным объему, занимаемому поровой водой, что будет соответствовать полному водонасыщению грунта $S_r = 1$.

Известно, что степень влажности грунта определяется выражением

$$S_r = \frac{W \rho_s}{e \rho_w}, \quad (12)$$

где ρ_w – объемная масса воды; W – влажность грунта.

Примем в выражении (12) $S_r = 1$ и решим его относительно $e = e_y$. При полном водонасыщении, т.е. при $S_r = 1$, определим значение e_y

$$e_y = \frac{\rho_s \omega}{\rho_w}. \quad (13)$$

Выражение (13) определяет величину коэффициента пористости грунта e_y , уплотненного до состояния, когда степень влажности S_r стала равна 1, т.е. до полного водонасыще-

ния. Это состояние является пределом уплотнения грунта. При дальнейшем увеличении нагрузки (в нашем случае забивки свай) будет иметь место выпор грунта на поверхность.

Подставив в выражение (5) значение (13) и решая относительно ρ_d , получим объемную массу скелета грунта, уплотненного до состояния, когда грунт полностью водонасыщен

$$\rho_{d,y}^{\max} = \frac{\rho_s \rho_w}{\rho_w + \rho_s w}. \quad (14)$$

Поскольку максимальное уплотнение, определяемое по формуле (14) достигается лишь вблизи свай, а с удалением от свай оно уменьшается по линейной зависимости, то средний прирост объемной свай скелета грунта $\Delta \rho_d$ для всей зоны уплотнения будет в два раза меньше максимального и может быть записан в виде

$$\Delta \rho_d = \frac{\rho_s \rho_w}{2(\rho_w + \rho_s w)} - \frac{\rho_d}{2}. \quad (15)$$

Тогда расчетное значение объемной массы скелета грунта $\rho_{d,y}^p$ в пределах всего объема уплотнения после забивки свай будет равно

$$\rho_{d,y}^p = \frac{\rho_d}{2} + \frac{\rho_s \rho_w}{2(\rho_w + \rho_s w)}. \quad (16)$$

После преобразования выражения (16) имеем

$$\rho_{d,y}^p = \frac{\rho_d v + \rho_s \rho_w}{2v}, \quad (17)$$

где $v = \rho_w + \rho_s w. \quad (18)$

Подставляя (17) в (10) и (11), получим:

– для свай сплошного сечения

$$V_y = \frac{V_{св}(\rho_d v + \rho_s \rho_w) - 2V_6 \rho_d v}{\rho_s \rho_w - \rho_d v}; \quad (19)$$

– для свай-оболочек

$$V_y = \frac{V_{св}(\rho_d v + \rho_s \rho_w) - 2\rho_d v(V_6 + V_я)}{\rho_s \rho_w - \rho_d v}. \quad (20)$$

На основании целого ряда экспериментальных исследований натурных свай в полевых условиях [14] было установлено, что для свай постоянной по глубине сечения форма зоны уплотнения околосвайного грунта может быть принята в виде цилиндра высотой $l+d$ (где d – размер поперечного сечения свай, l – длина свай), а для пирамидальных свай – в виде эллипсоида вращения второго порядка с вертикальной полуосью $\frac{1}{2}(l+d_n)$, (где l – длина свай, d_n – размер поперечного сечения нижнего конца свай) и горизонтальной полуосью r_y .

Тогда радиус зоны уплотнения r_y для свай постоянного по глубине сечения равен

$$r_y = \sqrt{\frac{V_y}{\pi(l+d)}}, \quad (21)$$

Следует отметить, что метод расчета является приближенным, поскольку в расчетной схеме не учитываются некоторые сложные труднооцениваемые процессы – растворение воздуха в поровой воде при повышении нормальных напряжений, частичная фильтрация поровой воды, которая имеет место даже при кратковременном действии нагрузки [15], что и обуславливает некоторое расхождение опытных данных с расчетными.

Выводы

1. Аналитически получено решение задачи по определению параметров уплотненной зоны грунта вокруг свай с учетом физических характеристик грунта и геометрических параметров свай.

2. Достоверность методики расчета подтверждена результатами экспериментальных исследований в полевых условиях в глинистых грунтах на примере сваи пирамидальной формы.

3. Полученное аналитическое решение может быть использовано для выбора оптимального шага свай при проектировании свайно-плитных фундаментов из забивных призматических свай и фундаментов из пирамидальных штампоабивных свай.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов. Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

Библиографический список

1. Бартоломей, А.А. Прогноз осадок свайных фундаментов / А.А. Бартоломей, И.М. Омельчак, Б.С. Юшков. – М.: Стройиздат, 1994. – 384 с.
2. Готман, А.Л. Сваи и свайные фундамент. Конструирование, проектирование, технологии / А.Л. Готман, Р.А. Мангушев, А.Б. Знаменский. – М.: АСВ, 2015. – 320 с.
3. Пономарев, А.Б. Основы исследований и расчета фундаментов из полых конических свай / А. Б. Пономарев. – М.: АСВ, 2005. – 160 с.
4. Mandolini, A. Pile foundations: experimental investigations, analysis and design / A. Mandolini, G. Russo, C. Viggiani // Proc. of the 16th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Osaka: Millpress, 2005. – P. 177–213.
5. Пилягин, А.В. Напряженно-деформированное состояние основания свай при испытании статическим нагружением / А.В. Пилягин, А.Б. Шукенбаев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2001. – № 3. – С. 2–6.
6. Znamenskiy, V. Behavior of single pile and pile groups in consolidating clay / V. Znamenskiy, O. Hegazy, D. Sayed // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 883, №. 1. – P. 012208.
7. Шулятьев, О.А. Взаимодействие забивных свай с грунтом и между собой в составе свайного поля / О.А. Шулятьев, А.И. Харичкин // Численные методы расчетов в практической геотехнике: сб. ст. научно-технич. конф. СПбГАСУ. – 2012. – С. 228–234.
8. Готман, Н.З. Расчет предельного сопротивления основания сваи в составе групп / Н.З. Готман, В.С. Алехин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2020. – № 1. – С. 8–13.
9. Голубков, В.Н. Вопросы исследования свайных фундаментов и проектирования по деформациям: дис. ... д-р тех. наук / В.Н. Голубков. – Одесса, 1968.
10. Тугаенко, Ю.Ф. Процессы деформирования грунтов в основаниях фундаментов, свай и свайных фундаментов / Ю.Ф. Тугаенко. – Одесса: Астропринт, 2008. – 214 с.
11. Лапшин, Ф.К. Расчет осадок пирамидальных свай / Ф.К. Лапшин // Основания, фундаменты и механика грунтов: межведомственный тематический сб. трудов. – Л., 1978.

12. Сердюк, И.П. Расчетный метод определения расстояния между забивными сваями в глинистых грунтах / И.П. Сердюк, Б.И. Далматов // Основания и фундаменты: межвузовский сборник. – Новочеркасск, 1976.
13. Цытович, Н.А. Механика грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1979. – 272 с.
14. Аббасов, П.А. Некоторые результаты исследований призматических, профилированных и клиновидных свай с грунтом оснований / П.А. Аббасов, В.И. Федоров // Технология строительного производства: Труды ДВПИ. – Т. 106. – Владивосток. – 1975.
15. Абелев, М.Ю. Слабые водонасыщенные глинистые грунты как основания сооружений / М.Ю. Абелев. – М.: Стройиздат, 1977. – 288 с.

References

1. Bartolomey A.A., Omelchak I.M., Yushkov B.S. Forecast of sedimentation of pile foundations. Moscow, Stroyizdat, 1994, 384 p.
2. Gotman A.L., Mangushev R.A., Znamensky A.B. Piles and pile foundations. Construction, engineering, technologies. Moscow, ASV, 2015, 320 p.
3. Ponomarev A.B. Fundamentals of research and calculation of foundations from hollow conical piles. Moscow, ASV, 2005, 160 p.
4. Mandolini A., G. Russo, C. Viggiani. Pile foundations: experimental investigations, analysis and design. *Proc. of the 16th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Osaka, Millpress, 2005, pp. 177-213.
5. Pilyagin A.V., Shukenbaev A.B. Stress-strain state of the pile base during static loading testing. *Bases, foundations and soil mechanics*, 2001, no. 3, pp. 2-6.
6. Znamenskiy V., Hegazy O., Sayed D. Behavior of single pile and pile groups in consolidating clay. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2020, vol. 883, no. 1, p. 012208.
7. Shulyatyev O.A., Kharichkin A.I. Interaction of driven piles with soil and with each other as part of a pile field. Numerical calculation methods in practical geotechnics: collection of scientific and technical Conference of St. Petersburg State University, 2012, pp. 228-234.
8. Gotman N.Z., Alyokhin V.S. Calculation of the ultimate resistance of the pile base as part of groups. *Bases, foundations and soil mechanics*, 2020, no. 1, pp. 8-13.
9. Golubkov V.N. Issues of research of pile foundations and design of deformations. Doctor's degree dissertation. Odessa, 1968.
10. Tugaenko Yu.F. Processes of soil deformation in the foundations of foundations, piles and pile foundations. Odessa, Astroprint, 2008, 214 p.
11. Lapshin F.K. Calculation of sediments of pyramidal piles. *Bases, foundations and soil mechanics*. Interdepartmental thematic collection of works. Leningrad, 1978.
12. Serdyuk I.P., Dalmatov B.I. Computational method for determining the distance between driven piles in clay soils. *Bases and foundations. Interuniversity collection*. Novocherkassk, 1976.
13. Tsytovich N.A. Mechanics of soils. Moscow, Vysshaya shkola, 1979, 272 p.
14. Abbasov P.A., Fedorov V.I. Some results of studies of prismatic, profiled and wedge-shaped piles with soil bases. *Technology of construction production. Materials DVPI*. Vol. 106. Vladivostok, 1975.
15. Abelev M.Y. Weak water-saturated clay soils as foundations of structures. Moscow, Stroyizdat, 1977, 288 p.