

УДК 624.154

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-376-384

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЕЖУТОЧНОГО РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО СЛОЯ СВАЙНОГО ФУНДАМЕНТА

И. Г. Ткачев, М. Б. Мариничев

Кубанский государственный аграрный университет имени И. Т. Трубилина,
г. Краснодар, Россия

Аннотация. Рассматривается методика назначения параметров свайного фундамента с промежуточным распределительным слоем, расположенным между фундаментной плитой и головами свай. Актуальность исследования обусловлена необходимостью управления передачей нагрузки от фундаментной плиты к сваям и грунту межсвайного пространства при проектировании фундаментов многоэтажных и высотных зданий. На основе аналитического метода расчета предложена последовательность выбора диаметра, шага и длины свай, толщины промежуточного распределительного слоя и габаритов оголовков. Расчетная схема основана на рассмотрении ячейки свайного поля, в которой промежуточный слой работает как деформируемый элемент, формирующий над головой сваи зону уплотненного материала по типу «несущего столба». Показано, что толщина слоя и диаметр оголовка существенно влияют на расчетное продавливающее усилие и напряжения в уровне контакта головы сваи с промежуточным распределительным слоем. Приведены результаты применения методики при обосновании свайных фундаментов высотных зданий в сложных инженерно-геологических условиях.

Ключевые слова: свайный фундамент, промежуточный распределительный слой, свайно-плитный фундамент, бесконтактная работа плиты и свай, оголовок сваи, продавливающее усилие, несущий столб, осадка, численное моделирование

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF THE INTERMEDIATE LOAD-DISTRIBUTING LAYER IN PILE FOUNDATIONS

I. G. Tkachev, M. B. Marinichev

I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Annotation. The paper considers a method for selecting parameters of a pile foundation with an intermediate load-distribution layer placed between the raft and pile heads. The relevance of the study is associated with the need to control load transfer from the raft to piles and soil in the inter-pile space when designing foundations for multi-storey and high-rise buildings. Based on an analytical calculation method, a sequence is proposed for selection of pile diameter, pile spacing, pile length, thickness of the intermediate layer and pile cap dimensions. The calculation scheme is based on a pile field unit cell, where the intermediate layer is treated as a deformable element forming a compacted material zone above the pile head similar to a bearing column. It is shown that the layer thickness and pile cap diameter significantly affect the punching force and stresses at the contact level between the pile head and the intermediate load-distribution layer. Results of applying the method to high-rise building foundations in complex engineering-geological conditions are presented.

Keywords: pile foundation, intermediate load-distribution layer, piled raft foundation, pile cap, punching force, bearing column, settlement, numerical modelling

Введение

Свайные фундаменты в высотном и многоэтажном строительстве являются эффективным решением для случаев, когда основание сложено слабыми грунтами большой мощности, и возводимый объект расположен на участке с распространением опасных инженерно-геологических процессов, что приводит к значительным сжимающим и горизонтальным нагрузкам, возникающим в элементах свайного фундамента. В традиционной свайно-плитной схеме жесткий контакт плиты с головами свай вызывает концентрацию усилий в верхней части свай.

Одним из способов регулирования совместной работы плиты, свай и грунтового основания является устройство промежуточного распределительного слоя (далее ПРС). В этом случае нагрузка передается через деформируемую среду, которая изменяет долю усилий, воспринимаемых сваями и межсвайным грунтом. Механизмы передачи нагрузки через сыпучий слой рассмотрены в экспериментальных и численных исследованиях [1–7]. Решаемая задача состоит в обосновании толщины, прочностных и деформационных характеристик промежуточного слоя, а также габаритов оголовков свай. Эти параметры определяют распределение напряжений и деформаций в элементах системы. Цель настоящей статьи состоит в описании результатов исследований по совершенствованию конструкции и методов расчета свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем из сыпучего материала, обеспечивающих их надежную эксплуатацию в пылевато-глинистых грунтах для промышленных и гражданских зданий.

Материалы и методы

Исследование выполнено применительно к системе «фундаментная плита – промежуточный распределительный слой – сваи – грунтовое основание» (рис. 1). В качестве расчетной области принята ячейка свайного поля, включающая сваю, участок промежуточного слоя и грунт межсвайного пространства.

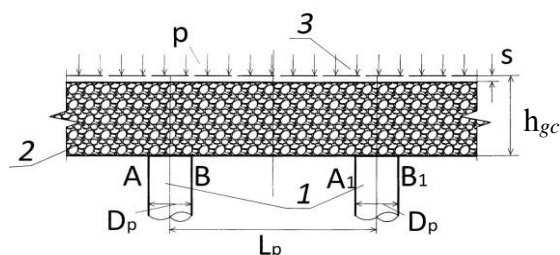


Рис. 1. Сечение вертикальной плоскостью свайного фундамента с ПРС:

1 – свая; 2 – ПРС; 3 – плита/ростверк многоэтажного здания

Варьируемыми параметрами являются диаметр свай D_p , шаг свай L_p , длина свай l , толщина промежуточного распределительного слоя h_{gc} и диаметр оголовка D_h [8–9].

При квадратной сетке свай вертикальная сила, приходящаяся на расчетную ячейку, определяется как

$$N_f = \sigma_f L_p^2,$$

где σ_f — среднее давление по подошве фундаментной плиты; L_p — межосевое расстояние между сваями. Равновесие ячейки записывается в виде

$$N_f = N_p + N_b,$$

где N_p — усилие, воспринимаемое сваями; N_b — усилие, воспринимаемое грунтом межсвайного пространства. Условие расчета по деформациям принимается в виде

$$s_f \leq s_u,$$

где s_f — расчетная осадка фундаментной системы; s_u — предельная осадка для соответствующего типа здания [10]. Для фундамента с промежуточным распределительным слоем расчетная осадка представляется как

$$s_f = s_{gc} + s_p + s_b,$$

где s_{gc} — сжатие промежуточного распределительного слоя; s_p — осадка свай; s_b — осадка грунтового основания ниже уровня голов свай.

Для предварительной оценки деформационной эффективности используется коэффициент

$$k_{ef} = S_{pile}/S_{slab},$$

где S_{pile} — осадка свайного фундамента с промежуточным распределительным слоем; S_{slab} — осадка фундаментной плиты на естественном основании. Параметры системы назначаются не только по снижению осадки, но и с учетом распределения нагрузки между плитой, промежуточным слоем, сваями и грунтом межсвайного пространства, оцениваемого по коэффициентам k_{Ntop} , k_{Nmax} [8].

Передача нагрузки через промежуточный распределительный слой описывается схемой «несущего столба» (рис. 1, 2), формирующегося в зоне уплотненного материала над головой сваи. Границы зоны передачи нагрузки принимаются расходящимися от края головы сваи или оголовка с отклонением от вертикали на угол

$$\beta_{gc} = 45^\circ - \varphi_{gc}/2,$$

где φ_{gc} — угол внутреннего трения материала промежуточного распределительного слоя. Диаметр верхнего основания зоны передачи нагрузки определяется выражением

$$D_B = D_h + 2h_{gc} \tan \beta_{gc},$$

где D_h — диаметр головы сваи или оголовка; при отсутствии оголовка $D_h = D_p$.

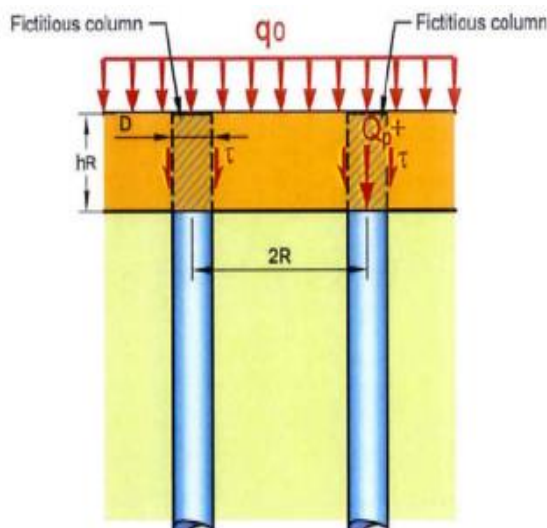


Рис. 1. Схема «несущего столба» грунта по [7]:

q_0 – вертикальная нагрузка на ПРС;
 h_R – высота ПРС; D – диаметр «несущего столба»; Q_p – нагрузка на оголовки свай; τ – касательные силы на границах «несущего столба»

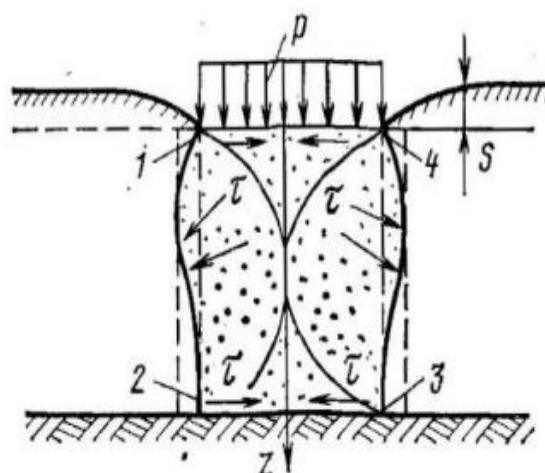


Рис. 2. Идея «несущего столба» грунта по [11]:

P – вертикальная нагрузка на ПРС;
 S – осадка «несущего столба»;
 τ – касательные силы на границах «несущего столба»

Площадь контакта сваи или оголовка с промежуточным распределительным слоем определяется по фактическому диаметру контактной площадки (рис. 3):

$$F_h = \frac{\pi D_h^2}{4}.$$

В аналитической оценке среднее контактное напряжение может быть определено как

$$\sigma_p = \frac{N_p}{F_h}.$$

При этом в численной модели распределение напряжений в контактной зоне является неравномерным, поэтому для сопоставления вариантов дополнительно используются осредненные по расчетной контактной области значения напряжений, полученные непосредственно из результатов численного моделирования. Площадь верхнего основания зоны передачи нагрузки составляет

$$F_B = \frac{\pi D_B^2}{4}.$$

Для сохранения физической корректности ячеечной схемы должно выполняться условие

$$D_B < L_p. \quad (1)$$

При невыполнении условия зоны передачи нагрузки соседних свай перекрываются, и расчет по независимой ячейке следует заменять пространственной расчетной моделью.

Прочность промежуточного распределительного слоя проверяется по критерию Кулона–Мора в эффективных напряжениях:

$$\tau_{mob} \leq c'_{gc} + \sigma'_n \tan \varphi'_{gc},$$

где τ_{mob} — мобилизованное касательное напряжение; c'_{gc} , φ'_{gc} — эффективные параметры прочности материала слоя; σ'_n — эффективное нормальное напряжение на поверхности сдвига. Для щебеночных и щебеночно-песчаных смесей параметры c'_{gc} , φ'_{gc} и E_{gc} должны определяться лабораторно, предпочтительно в условиях трехосного сжатия [12]. При отсутствии экспериментального подтверждения сцепление несвязного материала следует принимать равным нулю.

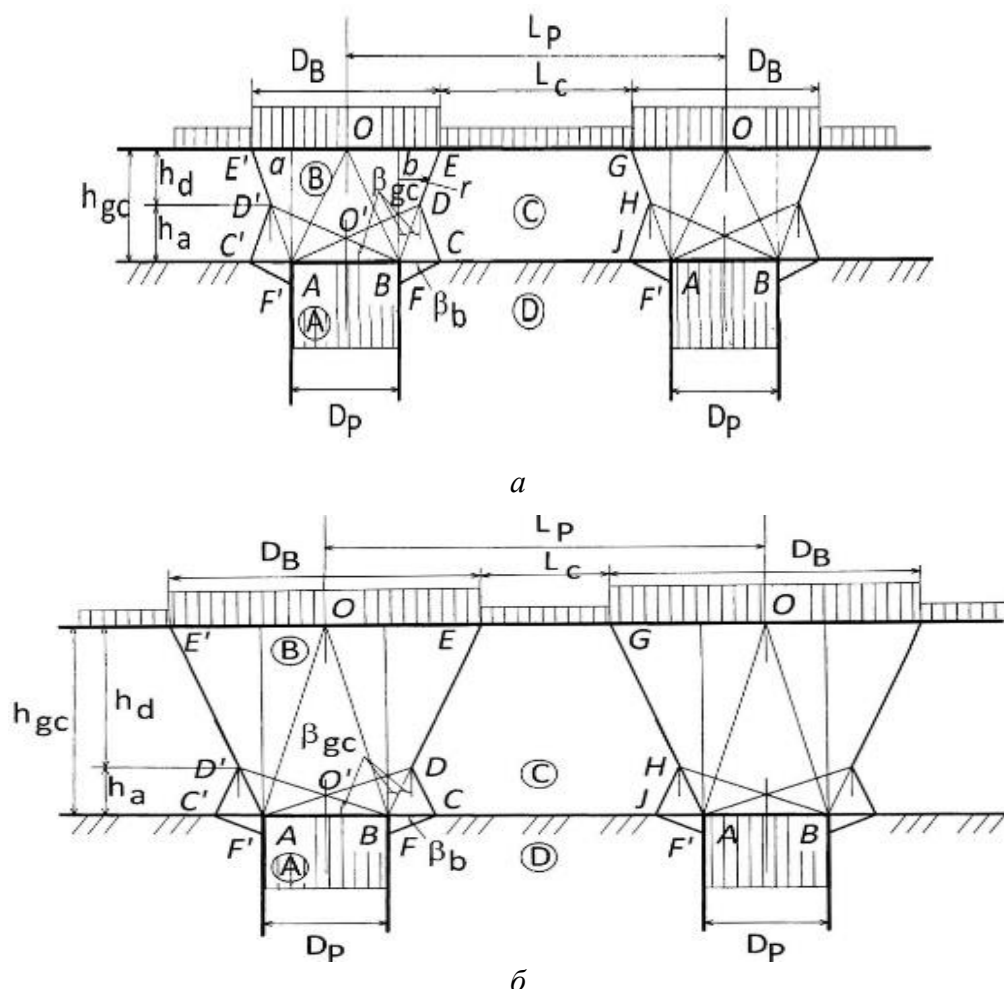


Рис. 3. Схема к расчету ПРС для значений h_{gc}/D_p : а) 1,0; б) 2,0:

L_p — межсоевое расстояние между сваями; L_c — расстояние между следами верхних оснований «несущих столбов»; D_B — диаметр верхнего основания «несущего столба»; D_p — диаметр головы свай; h_{gc} — высота ПРС

Дополнительно вводится ограничение относительной локальной деформации промежуточного слоя в зоне головы сваи:

$$\varepsilon_{gc} = \frac{\Delta h_{gc}}{h_{gc}} \leq \varepsilon_{\text{lim}} / \quad (1)$$

В настоящем исследовании $\varepsilon_{\text{lim}} = 5\%$ принято как критерий сохранения распределительной функции слоя и используется для предварительного сравнения вариантов.

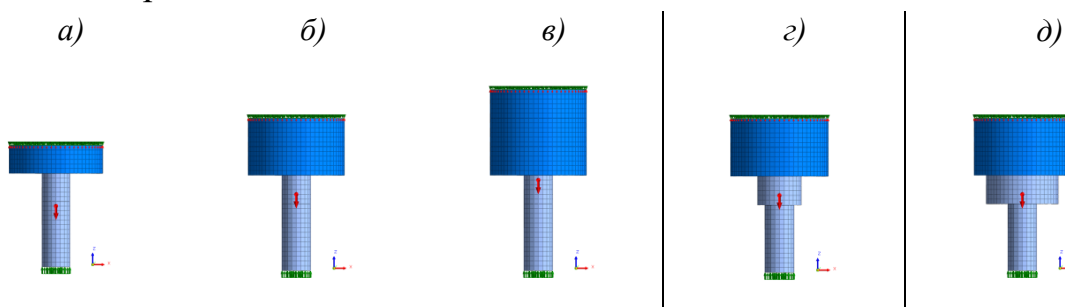


Рис. 4. Примеры задач к определению допустимых напряжений и усилий, передаваемых от свай на ПРС при заданном уровне перемещений над сваями:

a – свая без оголовка при $h_{gc}=d$; *б* – то же при $h_{gc}=2d$; *в* – то же при $h_{gc}=3d$;
г – свая с оголовком $D_h=1.5d$ и $h_{gc}=2d$; *д* – то же $D_h=2.5d$ и $h_{gc}=2d$

Результаты

Выполненные расчеты показывают, что способность промежуточного распределительного слоя воспринимать локальную нагрузку от головы сваи определяется главным образом толщиной слоя h_{gc} и диаметром контактной площадки D_h . При увеличении толщины слоя зона передачи нагрузки развивается по высоте, а при увеличении диаметра оголовка снижается концентрация напряжений в нижней части промежуточного распределительного слоя.

В табл. 1 приведены значения расчетного продавливающего усилия и напряжений в зоне контакта для вариантов $h_{gc} = D_p, 2D_p, 3D_p$ и $D_h = D_p, 1,5D_p, 2,5D_p$, полученные при ограничении локальной деформации $\varepsilon_{gc} = 5\%$ [12].

Таблица 1. Расчетное продавливающее усилие $N_{p,5\%}$ и осредненное по результатам численного моделирования напряжение $\sigma_{p,5\%}^{num}$ в зоне контакта при ограничении локальной деформации $\varepsilon_{gc} = 5\%$

Толщина промежуточного распределительного слоя	Габарит оголовка сваи D_h		
	$D_h = D_p$	$D_h = 1,5D_p$	$D_h = 2,5D_p$
$h_{gc} = D_p$	176 кН / 2604 кПа	339 кН / 2150 кПа	906 кН / 2058 кПа
$h_{gc} = 2D_p$	272 кН / 4027 кПа	479 кН / 3041 кПа	1188 кН / 2696 кПа
$h_{gc} = 3D_p$	341 кН / 5051 кПа	676 кН / 4285 кПа	1344 кН / 3051 кПа

Примечание. Значения напряжений $\sigma_{p,5\%}^{num}$, приведенные в табл. 1, являются осредненными значениями, полученными непосредственно по результатам численного моделирования в расчетной контактной области с учетом неравномерного распределения напряжений в материале промежуточного распределительного слоя в зоне контакта с головой сваи или оголовком.

В табл. 1 усилие $N_{p,5\%}$ характеризует нагрузку, передаваемую сваей или оголовком на промежуточный распределительный слой до достижения локального сжатия $\varepsilon_{gc} = 5\%$ в зоне контакта. Следовательно, увеличение $N_{p,5\%}$ при росте h_{gc} отражает повышение расчетной воспринимаемой нагрузки промежуточным слоем в зоне передачи усилия от сваи.

Наиболее существенный эффект дает не только увеличение толщины промежуточного распределительного слоя, но и устройство оголовков. Они увеличивают площадь контакта сваи с промежуточным распределительным слоем. За счет этого нагрузка передается на больший объем материала слоя, что повышает значение $N_{p,5\%}$ и снижает осредненные напряжения в контактной зоне.

Для сопоставления вариантов использован безразмерный коэффициент $K_{p,s} = N_{p,5\%}/N_{p,5\%}^{max}$, где $N_{p,5\%}$ — нагрузка, передаваемая сваей или оголовком на промежуточный распределительный слой при достижении локального сжатия $\varepsilon_{gc} = 5\%$, а $N_{p,5\%}^{max}$ — максимальное значение этой нагрузки в рассматриваемой расчетной серии. Цветовые диапазоны на рис. 5 показывают интервалы изменения $K_{p,s}$: от минимальных значений 0,00–0,20 до наибольших значений 0,80–1,0.

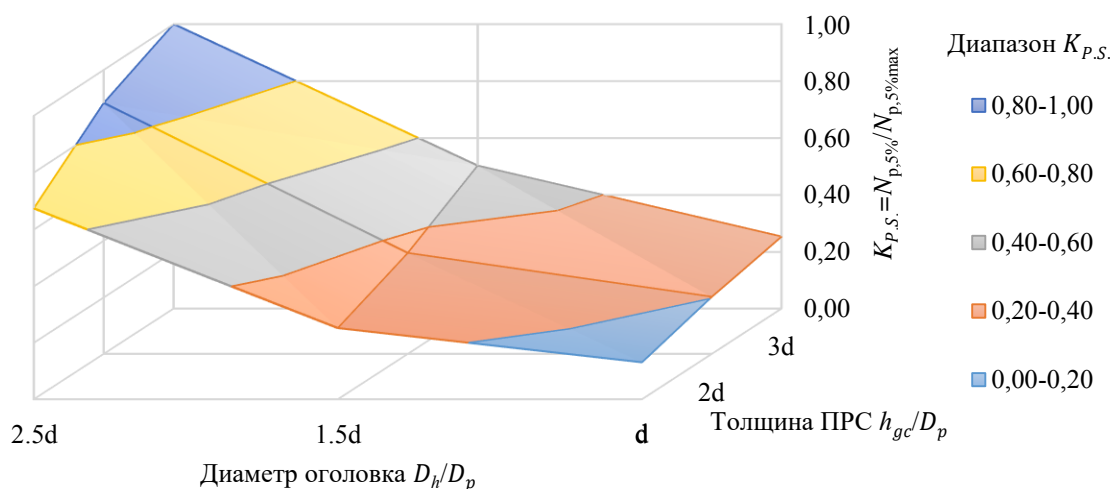


Рис. 5. Относительное продавливающее усилие $K_{p,s}$ при изменении толщины промежуточного распределительного слоя и диаметра оголовка сваи, $\varepsilon_{gc} = 5\%$

Полученные результаты согласуются с опубликованным экспериментальным и численным исследованиям фундаментов с промежуточным распределительным слоем: изменение толщины и жесткости такого слоя влияет на долю нагрузки, передаваемой на сваи, и на характер осадок системы [13–15]. Однако в рассматриваемой методике дополнительно учитывается не только общее перераспределение нагрузки, но и локальная проверка продавливания промежуточного распределительного слоя головой сваи или оголовком.

Обсуждение

Физическая суть работы промежуточного распределительного слоя заключается в исключении прямого жесткого контакта фундаментной плиты с головами свай и передаче нагрузки через деформируемую распределяющую среду. При достаточной толщине и прочности слой вовлекает в работу грунт межсвайного пространства и снижает локальную концентрацию напряжений; при недостаточных параметрах возрастает риск продавливания в зоне головы сваи [16, 17].

Устройство оголовков увеличивает площадь контакта сваи с промежуточным распределительным слоем, снижает локальные напряжения и вовлекает в работу больший объем материала слоя. Однако увеличение D_h не может рассматриваться как универсальное решение, поскольку при чрезмерном размере оголовка возможно перекрытие зон передачи нагрузки соседних свай. Поэтому параметры оголовка сваи D_h , высоты ПРС h_{gc} и шага свай L_p должны назначаться совместно с проверкой условия $D_B < L_p$.

Аналитический метод на основе расчетной ячейки и схемы «несущего столба» позволяет оценить напряжения в уровне головы сваи, возможность продавливания промежуточного распределительного слоя и необходимость устройства оголовков. При этом проверка материала слоя должна выполняться по критерию прочности Кулона-Мора в эффективных напряжениях с использованием экспериментально определенных параметров c'_{gc} , φ'_{gc} , E_{gc} .

Окончательное обоснование свайного фундамента с промежуточным распределительным слоем должно выполняться с учетом пространственной работы системы «плита — промежуточный распределительный слой — сваи — грунтовое основание» и результатов испытаний материала слоя. Практическое применение методики на объектах высотного строительства показывает, что промежуточный распределительный слой может эффективно использоваться как расчетный и конструктивный инструмент управления напряженно-деформированным состоянием свайно-плитного фундамента.

Список источников

1. Fioravante V. Load transfer from a raft to a pile with an interposed layer // *Géotechnique*. – 2011. – Vol. 61, No. 2. – P. 121-132. – DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.7.00187>
2. Fioravante V., Giretti D. Contact versus noncontact piled raft foundations // *Canadian Geotechnical Journal*. – 2010. – Vol. 47, No. 11. – P. 1271-1287.
3. Wong I. H., Chang M. F., Cao X. D. Raft foundations with disconnected settlement-reducing piles // *Design Applications of Raft Foundations*. – 2000. – P. 469-486. – DOI: <https://doi.org/10.1680/daorf.27657.0017>
4. Zhu X. Analysis of the load sharing behaviour and cushion failure mode for a disconnected piled raft // *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2017. – Vol. 2017. – Article 3856864. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/3856864>

5. Li N., Han X. Numerical tests on the mechanism of the cushion in composite foundation // *Rock and Soil Mechanics*. – 2000. – Vol. 21. – P. 10-15.
6. Liang F., Li J., Chen L. Optimization of composite piled raft foundation with varied rigidity of cushion // *Foundation Analysis and Design: Innovative Methods*. – 2006. – P. 29-34. – DOI: 10.1061/40865(197)3
7. Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements (for the English version). Projet National ASIRI. – Paris: Presses des Ponts, 2012. – ISBN 978-2-85978-462-1.
8. Ткачев, И. Г. Совершенствование конструкции и методов расчета свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем: дис. ... канд. техн. наук / И. Г. Ткачев. – Краснодар, 2025. – 192 с.
9. Мариничев, М. Б. Особенности расчета и конструирования свайных фундаментов с промежуточным распределительным слоем / М. Б. Мариничев, И. Г. Ткачев, И. Г. Азов // *Construction and Geotechnics*. – 2024. – Т. 15. – № 3. – С. 5-16. – DOI: 10.15593/2224-9826/2024.3.01.
10. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*.
11. Гольдштейн, М. Н. Механика грунтов, основания и фундаменты: учебник для вузов ж.-д. трансп. / М. Н. Гольдштейн, А. А. Царьков, И. И. Черкасов. – М.: Транспорт, 1981. – 320 с. – 268 ил., 29 табл., библиогр. 37 назв.
12. ГОСТ 12248.3–2020. Грунты. Определение характеристик прочности и деформируемости методом трехосного сжатия. – М.: Стандартинформ, 2020.
13. Мариничев М. Б. Фундаменты многоэтажных и высотных зданий в особых условиях Юга России: дис. ... д-ра техн. наук / М. Б. Мариничев. – Краснодар, 2023. – 355 с.
14. Marinichev M. B., Tkachev I. G. Foundations design and construction for high-rise buildings in seismic areas // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 918. – Art. 012020. – DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012020.
15. Мариничев, М. Б. Особенности строительства фундаментов высотных зданий на крутых склонах в районах с высокой сейсмичностью / М. Б. Мариничев, И. Г. Ткачев // *Строительство и архитектура*. – 2019. – Т. 7. – № 1. – С. 20-27. – DOI: 10.29039/article_5ca75f9b461354.57548169.
16. Мариничев М. Б. Разработка конструктивного решения вертикально армированного основания плитного фундамента высотного здания в сейсмическом районе / М. Б. Мариничев, И. Г. Ткачев // *Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении: Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Новочеркасск, 13–15 мая 2015 года*. – Новочеркасск, 2015. – С. 272-281.
17. Мариничев М. Б. Практическая реализация метода вертикального армирования неоднородного основания для компенсации неравномерной деформируемости грунтового массива и снижения сейсмических воздействий на надземное сооружение / М. Б. Мариничев, И. Г. Ткачев, Ю. Шлее // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – 2013. – № 94. – С. 279-299.

© Ткачев И. Г., Мариничев М. Б., 2026