

УДК: 624.152  
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.6  
EDN: FIGISC



## Численный анализ несущей способности композитной щебеночной сваи

Х. М. Шараф<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Казань, Российская Федерация

**Аннотация:** *Постановка задачи.* В слабых глинистых грунтах эффективность улучшения с помощью щебеночных свай может быть ограничена недостаточным боковым давлением на грунт. Для повышения эффективности необходимо укрепить щебеночные сваи, обеспечив минимально необходимое боковое давление. Верификация численного анализа проводилась с использованием программного комплекса Plaxis 2D 20 на основе утверждённой модели, основанной на исследованиях А. П. Амбили и С. Р. Ганди. Рассмотрены четыре варианта композитной сваи из бетона и щебня с одинаковыми свойствами материалов и граничными условиями. Цель исследования — оценить влияние бетонной части на поведение композитных свай по сравнению с обычными щебеночными сваями. Для этого решаются следующие задачи: сравнить результаты обычного исследования каменной колонны с предыдущим экспериментальным исследованием, чтобы подтвердить их согласованность и точность; изменить форму численного моделирования, сохранив при этом все установленные свойства материала и граничные условия.

*Результаты.* В работе представлены результаты численных исследований несущей способности композитных свай из бетона и щебня с увеличением бетонной части от 0,5 до 2,0 диаметра. Установлено, что вертикальное напряжение возрастает с увеличением длины бетонной части, повышающей жесткость щебеночной сваи и её несущую способность. При длине бетонной части, равной половине длины щебеночной сваи, напряжение удваивается до 2000 кПа при осадке 30 мм. Максимальное выпучивание происходит на глубине, равной одному диаметру сваи, что свидетельствует о снижении горизонтальной деформации при увеличении длины бетонной части.

*Выводы:* Результаты исследования имеют важное значение для строительной отрасли, поскольку концепция композитных свай из бетон-щебня сочетает преимущества традиционных щебеночных свай. Эти сваи обладают высокой несущей способностью, превосходящей обычные щебеночные, при конкурентоспособной цене. Кроме того, композитные сваи демонстрируют лучшую несущую способность по сравнению с буронабивными сваями аналогичных размеров и обеспечивают высокую устойчивость к разрушению при выпучивании. Величина деформации при выпучивании снижается с увеличением длины бетонной части, а жесткость свай увеличивается при близком расположении бетонной части к поверхности земли.

**Ключевые слова:** слабый грунт, осадка, несущая способность, композитная щебеночная свая

**Для цитирования:** Шараф Х. М. Численное исследование несущей способности композитной щебеночной сваи // Известия КГАСУ, 2024, № 4(70), с. 63-71, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.6, EDN: FIGISC

# Numerical study of the bearing capacity of a composite crushed stone column

H. M. Sharaf<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Kazan State University of Architecture and Engineering,  
Kazan, Russian Federation

**Abstract:** *Problem statement.* In weak clay soils, the effectiveness of the improvement technique using crushed stone columns may be limited due to insufficient lateral pressure on the soil. The crushed stone columns should be reinforced by providing the minimum required lateral confining pressure. Plaxis 2D 20 software package was used to verify the numerical analysis. The numerical model was validated based on previous studies and the same material properties and boundary conditions were chosen for the analysis as in the experimental study conducted by A. P. Ambili and S. R. Gandhi [21]. After confirming the validity of the model, four variants of concrete and crushed stone composite stone columns were considered keeping the same material properties and boundary conditions. The aim of the present study is to investigate and evaluate the effect of concrete part on the behavior of concrete-crushed stone composite stone columns compared to conventional crushed stone column. This is accomplished by comparing experimental and numerical results, including the following objectives: 1. To compare the results of the conventional stone column study with the previous experimental study to confirm their consistency and accuracy; 2. To modify the form of the numerical simulation while maintaining all established material properties and boundary conditions.

*Results:* The paper presents the results of numerical investigations of the bearing capacity of concrete and crushed stone composite columns with increasing concrete part within the range of 0.5 to 2.0 stone column diameter. The results showed that the vertical stress increases with increasing the length of the concrete part. The concrete part increases the stiffness of the crushed stone column, which in turn increases its bearing capacity. When the length of the concrete part approached half the length of the crushed stone column, the stress doubled to 2000 kPa at 30 mm settlement. The maximum bulging of the crushed stone column occurs at a depth equal to approximately one stone column diameter, which proves that the horizontal deformation decreases with increasing length of the concrete part of the stone column.

*Conclusions:* The significance of the results obtained for the construction industry lies in the fact that the concept of composite concrete-crushed stone columns successfully combines the advantages of various conventional crushed stone columns. These stone columns have a high bearing capacity superior to that of conventional crushed stone columns, and this is achieved at a competitive price. In addition, composite concrete-crushed stone columns show better bearing capacity compared to bored piles of similar diameter and length. In addition to these advantages, composite concrete-crushed stone columns provide significant resistance to bulging failure. The level of deformation associated with bulging decreases as the length of the concrete portion increases. Also, the stiffness of the concrete-crushed stone composite column increases if the concrete portion is located close to the ground surface.

**Keywords:** soft soil, settlement, bearing capacity, composite crushed stone column

**For citation:** Sharaf H.M. Numerical study of the bearing capacity of a composite crushed stone column // News of KSUAE , 2024, № 4(70), p. 63-71, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.6, EDN: FIGISC

## 1. Введение

Сваи из композитного щебня представляют собой эффективный, экономичный и экологически чистый способ повышения несущей способности и предотвращения значительной осадки слабых грунтов. Они широко применяются для укрепления фундаментов, расположенных на мягких почвах. Гранулированные сваи, которые также называют каменными, песчаными или щебенчатыми, состоят из уплотненного песка или гравия, которые размещаются в слабом грунте с помощью различных монтажных методов

[1-3]. Щебеночные сваи иногда именуется гибкими, поскольку обладают определённой степенью упругости [4-5].

Сравнение гибких и жестких свай показывает, что вертикальная несущая способность щебеночных свай в значительной степени зависит от поперечного сопротивления окружающего грунта. Однако ограничивающее давление, действующее вблизи поверхности, является относительно небольшим, что приводит к выпучиванию и разрушению свай на глубине, примерно в четыре раза превышающей их диаметр [6-9]. Стандартные рекомендации подтверждают результаты предыдущих исследований [10-11]. В связи с этим инженеры предложили ряд методов повышения несущей способности насыпных свай, однако эффективность этих мер продолжает зависеть от поперечного сопротивления слабых грунтов на поверхности земли. Кроме того, многие исследователи сосредоточились на различных подходах к увеличению предельной несущей способности щебеночных свай. Например, анализ изменения объема, деформаций, напряжений и осадки проводился как с помощью экспериментов, так и численного моделирования. В геотехнике два ключевых показателя, определяющих конструкцию и эксплуатационные характеристики фундаментов, это несущая способность и осадка. Несущая способность щебеночных свай, в основном, зависит от давления, создаваемого окружающим слабым грунтом [12]. Предыдущие экспериментальные исследования показали, что приложенная нагрузка передается от корпуса свай к окружающему грунту, а лишь небольшая часть нагрузки приходит на нижнюю часть свай [13].

Верхний слой слабого грунта оказывает значительное влияние на общую жесткость, несущую способность и строительные характеристики щебеночных свай. Наличие прочного верхнего слоя, например, из песка, способствует увеличению прочности и жесткости слабого грунта [14]. Жесткость и несущая способность грунта, обрабатываемого щебеночными сваями, уменьшаются с увеличением толщины верхнего слабого слоя. Выпучивающее разрушение, происходящее в пределах глубины, в четыре раза превышающей диаметр гранулированного столба. Исследования показывают, что выпучивание может произойти даже на глубине менее 2-3 метров [15]. Аналогичные эксперименты показывают, что выпучивающее разрушение фиксируется на глубине от 1,0 до 2,5 метров [16]. Проблема набухания и его влияние на слабую несущую способность грунта были предметом исследования [17]. На основе модифицированной модели деформационного обрушения были исследованы выпучивания и чрезмерные осадки, обусловленные набуханием [18]. Амбили и Ганди провели экспериментальное исследование и обнаружили, что при нагрузке на поверхность щебеночной сваи максимальное выпучивание происходит на глубине примерно  $0,5 d$  [15].

Цель данного исследования – проанализировать влияние бетонной части на несущей способности сваи, выполненной из композитного бетонно-щебеночного материала, как показано на рисунке 2. Для верификации численного анализа использовался программный пакет Plaxis 2D 20. Численная модель для валидации была одобрена на основе предыдущих исследований, при этом были выбраны такие же свойства материала и граничные условия, что и в аналитическом исследовании, проведенном А. П. Амбили и С. Р. Ганди [15].

Для этого решаются следующие задачи: сравнить результаты обычного исследования каменной колонны с предыдущим экспериментальным исследованием, чтобы подтвердить их согласованность и точность; изменить форму численного моделирования, сохранив при этом все установленные свойства материала и граничные условия.

## 2. Материалы и методы

Было выбрано программное обеспечение Plaxis 2D.V20 для проведения численного анализа нелинейных свойств грунта, исходя из его надежности и долговечности. Для проверки точности анализа использовался двумерный конечный элемент на базе Plaxis 2D 20, а также проведено сравнение с модельными испытаниями щебеночных свай под нагрузкой, описанными Амбили и Ганди [15]. Ячейки модели были заполнены однородным глинистым грунтом, причем диаметр каждой ячейки составлял 450 мм. Эти модели были использованы в экспериментах, где высота каждой модели была также равна 450 мм. В ходе испытаний, связанных с приложением нагрузки к модели, было

установлено соотношение между диаметром ячейки и диаметром щебеночной сваи  $S/d=4$ . В центре глинистого слоя была размещена щебеночная свая с диаметром 112,5 мм и высотой 450 мм. Свойства материалов, указанные в данной работе и использованные в дальнейшем анализе, представлены в таблице 1.

На рис. 1 в, г, д, е показаны общие двумерные конечно-элементные граничные условия, примененные для моделирования щебеночной сваи и окружающего её глинистого грунта.

Таблица 1  
Свойства материалов, использованных для испытания с помощью Plaxis D2 V20

Свойства	Материалы	
	Глинистый грунт	Щебеночный сваи
Модель деформации кПа (E)	5500	55
Коэффициент Пуассона ( $\nu$ )	0.42	0.3
Угол внутреннего трения ( $\phi$ )	0	38
Угол дилатансии ( $\psi$ )	0	4
Удельное сцепление кПа (C)	30	0

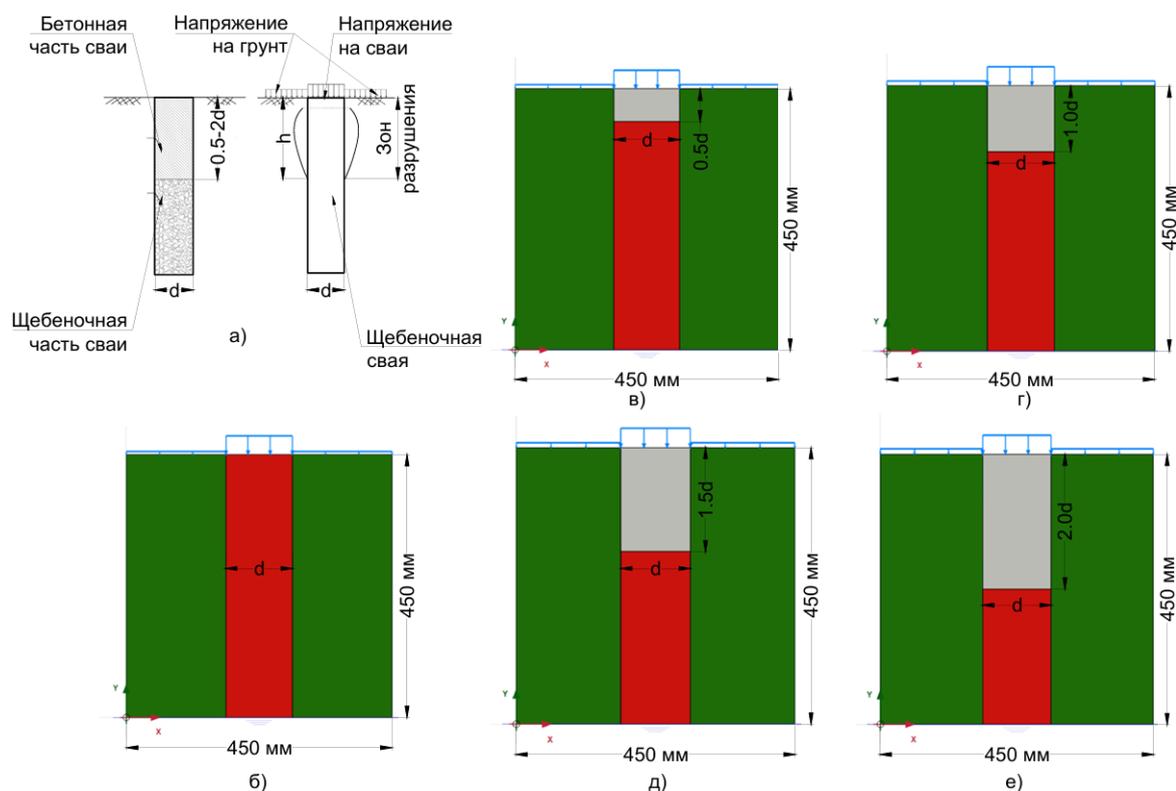


Рис.1. а) – Композитная бетон-щебеночная свая, бетонная часть в верхней части и щебеночная в нижней и механизм разрушения при выпучивании; б, в, г, д, е) – Ячейки модели заполнены однородным глинистым грунтом и в центре глинистого слоя установлены бетон-щебеночные сваи. (иллюстрация авторов)

Fig.1. a) - Composite stone column, concrete part at the top and crushed stone part at the bottom and bulging failure mechanism; b, v, g, d, e) - The model cells are filled with homogeneous clay soil and stone columns are installed in the center of the clay layer. (illustration by the authors)

В предыдущих исследованиях был проведен двумерный численный анализ с применением упругопластического критерия разрушения Мора-Кулона. Для этого использовалась конечная элементная дискретизация, основанная на модифицированных квадратичных треугольных элементах с плоской деформацией и определенными граничными условиями. Все узлы вдоль боковой поверхности модели были зафиксированы в радиальном направлении, а узлы на нижней границе ограничены в перемещениях как в радиальном, так и в вертикальном направлениях. При этом верхняя

поверхность имела возможность свободного движения в любых направлениях. Моделирование также учитывало трение между щебеночными сваями и окружающим грунтом, и применялись временные ограничения, которые предотвращали скольжение или разделение на интерфейсах. Эти временные ограничения указывали на идеальное сцепление между щебеночными сваями и грунтом на их контактах [19, 20].

Двумерный анализ проводился с использованием модели разрушения Мора-Кулона для характеристики материалов мягкой глины и щебня, взятых у А. П. Амбили и С. Р. Ганди [15]. В исследовании учитывались начальные напряжения, вызванные гравитационной нагрузкой, однако напряжение, создаваемое процессом установки щебеночных свай, в анализе не рассматривалось. Исходные параметры представлены в таблице 2. В качестве материала для моделирования использовался бетон с прочностью на сжатие 20 МПа.

Таблица 2

Свойства материалов, использованных в данном исследовании.

Свойства	Материалы		
	Глинистый грунт	Щебеночный свай	Бетон
Модель деформации кПа (E)	5500	55	$3 \cdot 10^7$
Коэффициент Пуассона ( $\nu$ )	0.42	0.3	0.17
Угол внутреннего трения ( $\phi$ )	-	38	-
Угол дилатансии ( $\psi$ )	-	4	-
Удельное сцепление кПа (C)	30	-	-
Удельный вес кН/м <sup>3</sup>	18.8	16.2	24
Прочность на сжатие МПа	-	-	20

Все численные анализы были выполнены с применением принципов геометрии элементарной ячейки. Исследование сосредоточено на одиночных композитных щебеночных сваях с монолитными бетонными элементами, а свойства используемых материалов варьировались для различных длин бетонной части свай, превышающих диаметр в 0,5, 1,0, 1,5 и 2,0 раза. Диаметр щебеночной свай для всех моделей составил 112,5 мм, в тоже время как диаметр ячейки составил 450 мм [9, 15].

### 3. Результаты и обсуждение

Как экспериментальные, так и конечно-элементные результаты показывают сопоставимое поведение в отношении предельной нагрузки, а также зависимости нагрузки от деформации. На основе сопоставления результатов лабораторных экспериментов А. П. Амбили и С. Р. Ганди [15] и данных, полученных с помощью аналитического моделирования в Plaxis 2d, можно сделать вывод о наличии тесной зависимости между напряжениями, воздействующими на щебеночной свай, и осадками, возникающими под их действием. Рис. 2. демонстрирует, что разница в результатах составляет всего 5 %, что позволяет применять Plaxis 2d для получения аналогичных показателей в следующих исследованиях.

Применение щебеночных свай значительно повышает несущую способность слабых грунтов. Щебеночные сваи могут увеличить предельную несущую способность грунта на 50-75%. В этом контексте композитные бетонно-щебеночные сваи также демонстрируют относительно высокую несущую способность благодаря жесткости, обеспечиваемой бетонной частью. Верхняя зона таких свай представляет собой цельную бетонную конструкцию, обладающую нормальной прочностью, которая способствует увеличению несущей способности благодаря созданию области повышенной жесткости вблизи поверхности грунта и сопротивлению разрушению.

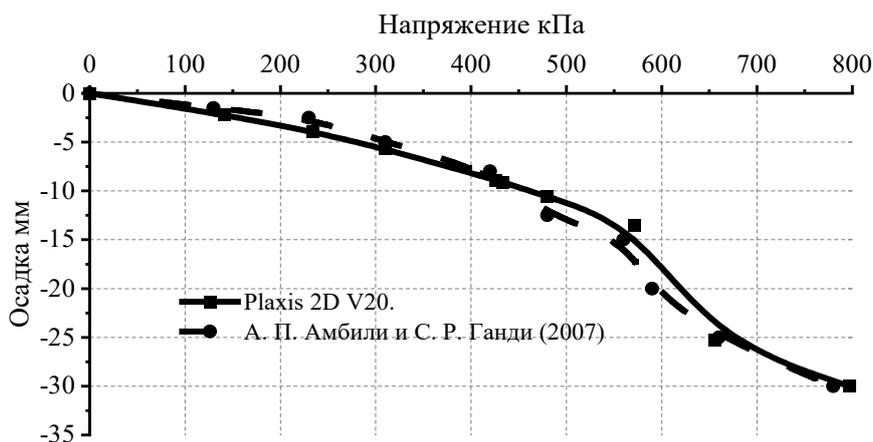


Рис. 2. Кривая зависимости напряжения от осадки обычной щебеночной свай в глинистом грунте, при  $s/d=4$  (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Stress versus settlement curve of a conventional stone column in clayey soil, at  $s/d=4$ . (illustration by the authors)

На рисунке 3 показаны зависимости вертикального напряжения от осадки композитной свай при различных длинах бетонной части. Из графика видно, что вертикальное напряжение возрастает с увеличением длины бетонной части. Этот элемент повышает жесткость щебеночной свай, что, в свою очередь, увеличивает её несущую способность. Максимальное вертикальное напряжение для щебеночной свай составило около 1000 кПа при осадке в 30 мм. Однако при длине бетонной части, достигающей половины общей длины щебеночной свай, напряжение возросло до 2000 кПа при той же осадке. Это связано с тем, что бетонная часть передает нагрузку на более глубокие слои грунта, где давление значительно выше. При этом окружающий грунт оказывает сопротивление выпячиванию свай, а благодаря наличию бетонной части крупномасштабное выпячивание смещается вниз в зону с повышенным сжимающим давлением, что приводит к увеличению вертикального напряжения.

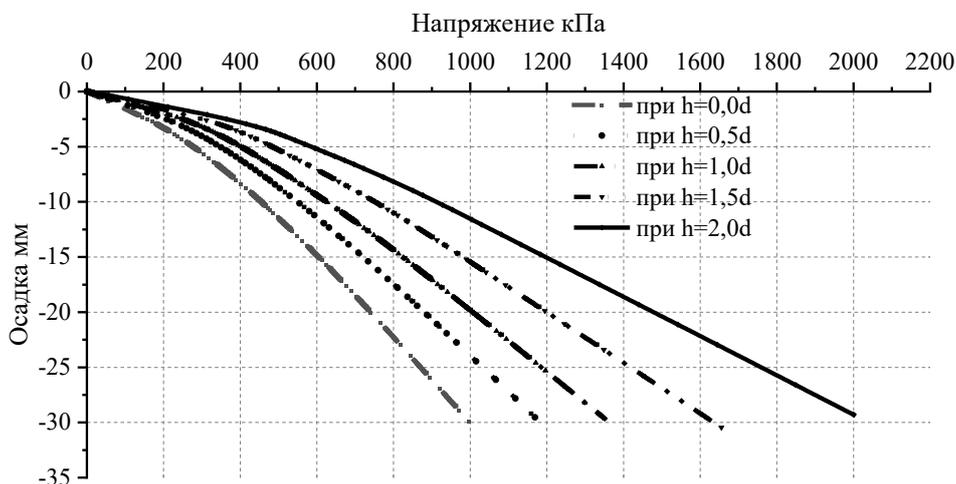


Рис. 3. Зависимость вертикального напряжения от осадки композитной бетонно-щебеночной свай с различными  $h$ ; где  $h$ - высота бетонной части свай и  $d$ - диаметр композитной бетонно-щебеночной свай (иллюстрация авторов)

Fig. 3. Dependence of vertical stress on settlement of composite stone column with different  $h$ ; where  $h$  is the height of the concrete part of the stone column and  $d$  is the diameter of the composite stone column. (illustration by the authors)

Горизонтальные напряжения в окружающем грунте направлены противоположно движению разрушения выпуклости. Кроме того, они увеличивают давление на грунт, что в свою очередь повышает несущую способность свай, помогая предотвратить их разрушение. Деформация выпячивания считается показателем несущей способности

щебеночных свай: увеличение этой деформации приводит к снижению их несущей способности. Из рисунка 4 видно, что максимальное выпучивание щебеночной сваи наблюдается на глубине, примерно равной одному диаметру сваи.

При использовании бетонной части  $h=0,5d$  устойчивость к выпучиванию значительно возрастает, снижая деформацию более чем на 15 % по сравнению со щебеночной сваей. Если бетонная часть составляет  $h=1,0d$ , устойчивость к разрушению от выпучивания увеличивается более чем на 50 % в сравнении с обычной щебеночной сваей. Также применение бетонной части в пределах  $h=1,0-2,0d$  приводит к незначительному снижению деформации выпучивания, что указывает на то, что на глубинах, превышающих 1,5-кратный диаметр каменной колонны, выпучивание больше не проявляется. Это подтверждает, что горизонтальная деформация уменьшается с увеличением длины бетонной части сваи, как показано на рисунке 4.

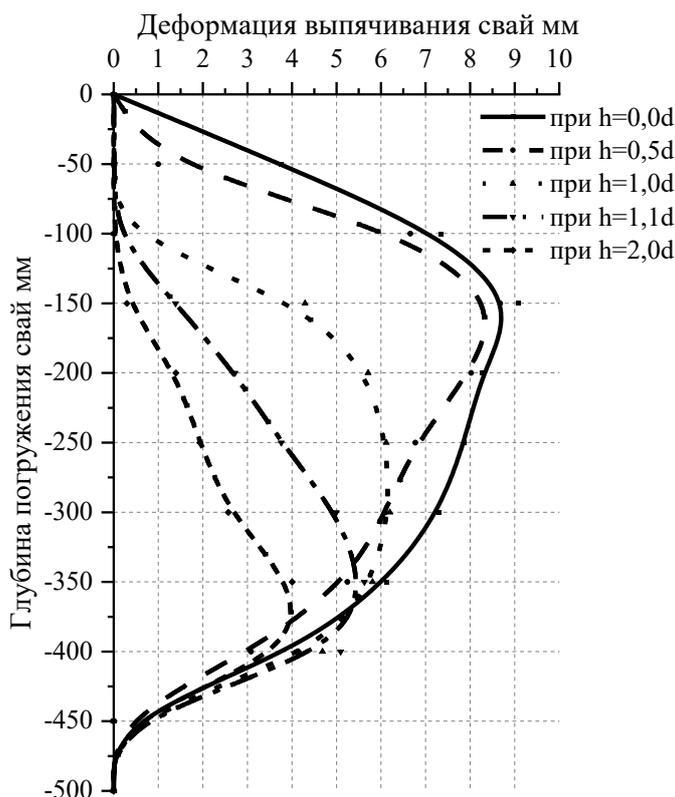


Рис. 4. Горизонтальные деформации (выпучивания свай) по длине погружения щебеночной сваи. (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Horizontal deformations (stone column bulges) along the length of the crushed stone column driving (illustration by the authors)

#### 4. Заключение

В данном исследовании были изучены характеристики композитных свай, состоящих из бетона и щебня, в глинистом грунте. Для анализа использовался двумерный конечный элемент в компьютерной программе Plaxis 2D версии 20. Рассматривались композитные сваи с четырьмя вариантами длины монолитной бетонной части (0,5, 1, 1,5 и 2 раза больше диаметра щебеночной сваи). Применялись нагрузки одновременно на площадь щебеночной сваи и площадь притока, при этом исследовались предельная несущая способность и разрушение от выпучивания. На основе проведенных наблюдений можно сделать следующие выводы:

1. Поведение композитных свай, выполненных из бетона и щебня, под действием нагрузок может быть значительно оптимизировано за счет включения монолитной бетонной части. Верхняя бетонная часть сваи улучшает ее жесткость, что приводит к возникновению значительных вертикальных напряжений даже при небольшом уровне осадки, что, в свою очередь, значительно повышает эффективность и надежность конструкции;

2. Длина бетонной части оказывает существенное влияние на несущую способность щебеночной сваи. При соотношении длины бетонной части к диаметру (2,0d) максимальная несущая способность сваи под нагрузкой увеличивается примерно два раза. Это увеличение объясняется возникновением горизонтальных напряжений в верхнем слое грунта и подчеркивает важность структурной интеграции монолитной бетонной части для повышения эффективности щебеночной сваи;

3. Выпучивание является ключевым фактором, значительно влияющим на несущую способность свай. Использование бетонной части повышает жесткость вблизи поверхности грунта, что позволяет сместить выпучивание на более глубокие уровни, где ограничивающее давление достаточно для противостояния деформациям.

4. Экспериментальные данные показывают, что при соотношении  $h=0,5d$  выпучивание уменьшается более чем на 30%. При этом, если выпучивание происходит на глубине, превышающей 1,5 раза диаметр свай, его влияние становится минимальным, и дальнейшее сокращение выпучивания не происходит. Это подчеркивает важность оптимизации длины бетонной части для эффективного снижения выпучивания.

### Список литературы / References

1. Guo Y., Zhao M., Peng W. Lateral bulging and settlement analysis of solid-bulk tandem compound pile based on modified strain wedge model // Chin. J. Geotechnic. Engineer., Vol. 41. P. 2149-2155, 2019. doi: <https://cnki.net>
2. McKelvey D., Sivakumar V., Graham J. Modelling vibrated stone columns in soft clay // Proc. Inst. Civ. Eng. Eng., Vol. 157, no. 3, P. 137-149, 2004. doi.org/10.1680/geng.2004.157.3.137.
3. Black J., Sivakumar V., McKinley j. Performance of clay samples reinforced with vertical granular columns // Can. Geotech. J. 2007. Vol. 44. no. 1. p. 89-95. doi.org/10.1139/t06-081
4. Shivashankar R., Babu M. R., Rajathkumar V. Experimental studies on behaviour of stone columns in layered soils // Geotech. Geol. Eng., vol. 29. no. 5. P. 749. 2011. doi.org/10.1007/s10706-011-9414-0.
5. Foraboschi P. Specific structural mechanics that underpinned the construction of Venice and dictated Venetian architecture // Eng. Fail. Anal., vol. 78, P. 169-195. 2017. doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.03.004.
6. Debbabi I. E., Saddek R. M., Rashid A., Muhammed. A. S. Numerical modeling of encased stone columns supporting embankments on sabkha soil // Civ. Eng. J., vol. 6, no. 8, P. 1593-1608, 2020. doi.org/10.28991/cej-2020-03091569.
7. Ambily A. P., Gandhi S. R. Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis // J. Geotech. Geoenviron. Eng., vol. 133. no. 4. P. 405-415, 2007. doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:4(405).
8. Debnath P., Dey A. K. Bearing capacity of geogrid reinforced sand over encased stone columns in soft clay // Geotext. Geomembr., vol. 45, no. 6, P. 653-664. 2017. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.08.006.
9. Mahmood S., Wang Q. Numerical Study on Bearing Capacity and Bulging of the Composite Stone Column // School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China. The Open Civil Engineering Journal, 2021, Vo.15. P. 13-128. DOI: 10.2174/1874149502115010013.
10. Jorge C. Modeling Stone Columns // Materials 2017, Vol. 10, P. 782; doi:10.3390/ma10070782
11. Murugesan S., Rajagopal K. Geosynthetic-encased stone columns: Numerical evaluation // Geotextiles and Geomembranes, Vo. 24. 2006, P. 349-358. doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.05.001.
12. Hartono N., Fathani F. Design of Stone Column to Mitigate Soil Liquefaction: Cases Study of Yogyakarta International Airport // Journal of the Civil Engineering Forum, 2023, Vo. 9(2). P. 195-208. DOI 10.22146/jcef.5933.
13. Basack S., Nimbalkar S. Load-Settlement Characteristics of Stone Column Reinforced Soft Marine Clay Deposit: Combined Field and Numerical Studies. Sustainability 2023, Vo. 15, P. 7457. doi.org/10.3390/su15097457.

14. Brian G., Bryan A., Minna K., Nallathamby. S. Stone column settlement performance in structured anisotropic clays: the influence of creep // *Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2016. Vo. 8. P. 672-688. doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.05.004.
15. Ambily A. P., Gandhi. R. Behavior of Stone Columns Based on Experimental and FEM Analysis // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2007. Vo. 133. Doi.1090-0241/2007/4-405–415/\$25.00.
16. Mounius B., Manendra S., Krishna K. Behavior of Horizontally Reinforced Stone Column in a Layered Soil: Enhancing Ground Improvement // *Journal of Mining and Environment (JME)*. 2024. Vo. 15. P. 537-555. DOI: 10.22044/jme.2023.13807.2565.
17. Mehrannia N., Kalantary F., Ganjian N. Experimental study on soil improvement with stone columns and granular blankets // *Journal of Central South University*. 2018. Vo. 25. P. 866–878. https://doi.org/10.1007/s11771 -018-3790-z.
18. Rezaei M.M., Lajevardi S. H., Saba H., Ghalandarzadeh, A., Zeighami E. Laboratory study on single columns reinforced with steel bars and discs // *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2019. Vo. 5. P.1-14. doi.org/10.1007/s40891 -019-0154-1.
19. Tan X., Zhao M., Chen w. Numerical simulation of a single stone column in soft clay using the discrete element method. *International Journal of Geomechanics*. 2018. Vo. 18. P. 1–12. doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943- 5622.0001308.
20. Mehrannia N., Nazariafshar J., Kalantary F. Experimental Investigation on the Bearing Capacity of Stone Columns with Granular Blankets // *Geotech Geol Eng.* 2017. P. 1-14. DOI 10.1007/s10706-017-0317-6.
21. Karkush M., Jabbar A., "Improvement of soft soil using linear distributed floating stone columns under foundation subjected to static and cyclic loading", *Civ. Eng. J.*, vol. 5. no. 3. P. 702-711. 2019. doi.org/10.28991/cej-2019-03091280.
22. Talgatovich, M.I., Ilgamovich, G.A. Special Aspects of Stress–Strain Analysis of Combined Piled-Raft Foundation Under Performance Static and Cyclic Loading // *Proceedings of STCCE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 291. doi.org/10.1007/978-3-031-14623-7\_9

#### Информация об автора

**Шараф Хани Мохаммед Абдо**, кандидат технических наук, старший преподаватель, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация  
E-mail: sharafhani03@gmail.com

#### Information about the author

**Hani M. A. Sharaf**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer. Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation  
E-mail: sharafhani03@gmail.com