

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ  
УДК 624.137.5:624.154  
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-5>

## Оценка влияния строительства армогрунтовых подпорных стен на фундаменты устоев раздельного типа



*Михаил Тарасович Збрыський*

*Московский государственный строительный университет, Москва, Россия.*

✉ [Zmt.work@mail.ru](mailto:Zmt.work@mail.ru).

Михаил ЗБРЫСЬКИЙ

### АННОТАЦИЯ

В последнее время все чаще находят своё применение строительство устоев раздельного типа с применением армогрунтовых подпорных стен. Но данные конструкции проектируются отдельно друг от друга, зачастую даже разными организациями. Цель данной работы состояла в том, чтобы определить влияние строительства армированных грунтовых подпорных стен на свайные фундаменты первой опоры. Основной решаемой задачей было выявление зависимости роста неблагоприятного влияния от высоты насыпи, влияния длины свай, заглубления, возможностей использования нелинейных моделей и видов постановки.

Комплексное моделирование в плоской и пространственных постановках показали необходимость учёта влияния при проектировании свайных фундаментов негативного воздействия дополнительных горизонтальных, вертикальных перемещений, а также изгибающих моментов и продольных усилий. При проведении исследования был зафиксирован фактор появления негативного трения, механизм которого требует отдельного изучения.

Основной вывод исследования состоит в необходимости разработки комплексной оценки влияния строительства армированных грунтовых подпорных стен на свайные фундаменты устоев.

Ключевые слова: транспортное строительство, свайные фундаменты, армированные грунтовые подпорные стены, оценка влияния, негативное трение, расчётная модель, армогрунт, устой раздельного типа.

Для цитирования: Збрыський М. Т. Оценка влияния строительства армогрунтовых подпорных стен на фундаменты устоев раздельного типа // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 5 (108). С. 46–52. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-5-5>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.  
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

## ВВЕДЕНИЕ

С точки зрения технологии строительного производства при возведении устоя моста с отдельными функциями рационально сначала забить сваи, а затем возводить армированную грунтовую подпорную стенку (далее АГПС).

Расчёт АГПС зачастую выполняется компаниями-производителями геосинтетических материалов (к ним относятся, в частности, такие фирмы, как Massafertí, Tensar, Huesker и др.). Для проектирования необходимо выполнить расчёты, позволяющие определить необходимые размеры, количество армирующих элементов и оптимальное расстояние между ними. После чего производятся проверки на внешнюю и внутреннюю устойчивость, опрокидывание, плоский сдвиг, деформации [1, С. 168; 2, С. 70; 3, С. 57; 4, С. 146].

Проектирование и расчёт конструкции устоя отдельной функции в свою очередь ведётся без учёта активного давления подводящей к мосту или путепроводу насыпи.

Таким образом, в настоящее время данные расчёты выполняются независимо друг от друга, разными отделами или организациями. Данное разделение исключает возможность комплексной оценки совместной работы элементов мостового сооружения. Наиболее неблагоприятно это сказывается на фундаментах первой опоры, которые в большинстве случаев являются свайными, претерпевающими горизонтальные и вертикальные перемещения, а также подвергающимися воздействию дополнительных усилий.

В данном исследовании были проведены совместные расчёты «фундамент-основание», относящиеся как к свайному фундаменту устоя, так и к влияющей на него армогрунтовой насыпи.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно закономерностям механики грунтов, проектирование фундаментов необходимо осуществлять с учётом их взаимного влияния друг на друга<sup>1,2</sup>. В то же время в действующих нормативных документах данные

проверки (оценка влияния) сводятся только к расчётам дополнительных деформаций уже существующей окружающей застройки, которые ограничиваются определёнными максимальными значениями в зависимости от технического состояния. В мостостроении данных предельных значений не установлено, не считая относящихся к высоким жёстким сооружениям и трубам, соответственно определять влияние от АГПС на уже существующий свайный фундамент устоя в рамках норм не требуется.

Кроме того, например, в работе [5, С. 19] указывается на возможность возникновения негативного трения на боковой поверхности существующих свайных фундаментов, вызванного касательными напряжениями в грунте, вблизи области загрузки. Учёт подобных дополнительных воздействий на здания и сооружения, попадающих в зону влияния нового строительства, в современной практике проектирования практически не производится.

В своих работах Н. М. Глотов и соавторы<sup>3</sup> [6, С. 90] обращают внимание на появление дополнительных горизонтальных напряжений от возведения подводящей насыпи в результате возникновения в грунте вертикальных напряжений от веса насыпи и предлагают метод учёта этого явления. Аналогичный учёт приводится в действующих нормативных документах, но только для примыкающей к устою подводящей насыпи<sup>4</sup>. Соответственно, если насыпь не примыкает, то такие проверки не требуются и не делаются.

В мостостроении широко используется модель упругого основания Фусса-Винклера [7, С. 42; 8, С. 49] и дальнейшие ее модификации. При этом грунт представляется определённым набором пружин с пропорциональной жёсткостью, в то время как сваи моделируются стержневыми элементами. Очевидно, что данная модель не подходит для подобной задачи. Решение задач в мостовом строительстве редко выполняется в специализированных геотехнических программах, таких как PLAXIS, MIDAS GTS/FEA NX, Z-SOIL и других.

<sup>1</sup> Ухов С. Б., Семенов В. В., Знаменский В. В. и др. Механика грунтов, основания и фундаменты: Учеб. пособие. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2005. – 528 с. – С. 129. ISBN 5-87829-003-0.

<sup>2</sup> Далматов Б. И., Бронин В. Н., Карлов В. Д., Мангушев Р. А. и др. Основания и фундаменты. Ч. 2. Основы геотехники: Учебник. – М.: Изд-во АСВ; СПбГАСУ, 2002. – 392 с. – С. 336. ISBN 5-93093-140-2.

<sup>3</sup> Глотов Н. М., Соловьев Г. П., Файнштейн И. С. Основания и фундаменты мостов: Справочник / Под ред. К. С. Силина. – М.: Транспорт, 1990. – 240 с. ISBN 5-277-00886-1.

<sup>4</sup> СП 35.13330.2011 Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84. С. 233 [Электронный ресурс]: <https://docs.cntd.ru/document/1200084849?ysclid=lmroclnp1o408250369>. Доступ 17.05.2023.



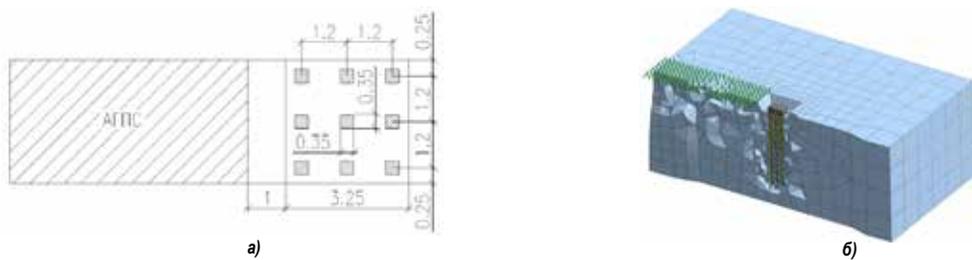


Рис. 1. Конечно-элементная модель: а) схема расчётного случая; б) пространственная конечно-элементная схема [разработано автором].

Чтобы показать неприменимость устоявшихся принципов проектирования, была выбрана программа, реализующая метод конечных элементов MIDAS FEA NX. Для конструктивных элементов, имеющих переменные параметры (шаг свай, размер сечений и т. д.), рекомендуется использовать трёхмерные расчётные схемы, что значительно усложняет процесс моделирования и трудозатраты инженера.

В настоящей работе были проведены численные исследования в следующих вариациях:

- плоская задача с использованием упругопластической модели Мора-Кулона;
- плоская задача с использованием упругопластической модели упрочняющегося грунта [Hardening Soil] [9, С. 281; 10, С. 13];
- объёмная задача с использованием упругопластической модели Мора-Кулона;
- объёмная задача с использованием упругопластической модели упрочняющегося грунта.

В двумерной постановке моделирование свай отдельными сетками конечных элементов (элементами плоской деформации) возможно только с учётом приведённой жёсткости, использование данного метода является не совсем корректным. Ввиду этого использовались специальные балочные элементы с заданным предельным сопротивлением по боковой поверхности и под пятой свай.

В трёхмерной модели сваи моделировались с помощью твердотельных конечных элементов (КЭ), а получение усилий осуществлялось при помощи виртуальной балки [Virtual beam], которая интегрирует полученные в КЭ напряжения по объёму сваи, а взаимодействие сваи с грунтом учитывается путём введения интерфейсных элементов [11, С. 34; 12, С. 19; 13, С. 26; 14, С. 36]. Конечно-элементная модель показана на рис. 1 б).

Геологические условия представлены одним слоем песка средней крупности, средней плотности, который имеет следующие физико-

механические параметры:  $p=19,5$  кН/м<sup>3</sup>;  $e=0,66$ ;  $c=1$  кПа;  $\varphi=35^\circ$ ;  $E=27$  МПа;  $P_{ref}=100$  кПа;  $\nu_{ur}=0,28$ ;  $E_{50}=15,7$  МПа;  $E_{oed}=13,5$  МПа;  $E_{ur}=122,3$  МПа;  $m=0,49$ ;  $K_0^{nc}=0,4$ .

Принимаем, что конструкция АГПС устойчива и ее можно заменить на эквивалентную расчётную вертикальную нагрузку.

Удельный вес грунта насыпи принимается за 18 кН/м<sup>3</sup>, расстояние от края насыпи до края ростверка – 1 метр. Очевиден тот факт, что чем дальше расположена подпорная стенка, тем меньшее воздействие будет оказано на фундамент. Стоит также отметить, что встречаются проекты, в которых примыкание АГПС к ростверку осуществляется практически впритык.

Высота насыпи изменялась от 6 до 13 метров, данные высоты являются типовыми в схожих проектах. Ростверк размерами 3,25 x 3,25 x 1,20 м содержит девять свай с шагом 1,2 м в продольном и поперечном направлении (рис. 1 а). Сваи варьировались по высоте от 7 до 15 метров сечением 35 x 35 (С7.35-С15.35). Заглубление от уровня поверхности до 1,7 метров.

Расчёт выполнялся с учётом стадийности возведения насыпи с отсыпкой по одному метру. Деформации стадий без участия дополнительной нагрузки от АГПС были обнулены.

Были проведены численные вычисления, в которых изменялись следующие параметры: размер расчётной модели, длина свай, заглублённый и незаглублённый ростверк, различие в физической нелинейности моделей грунтов (использование разных математических моделей для описания поведения грунтов).

Влияние насыпи на фундамент проявляется в виде следующих факторов:

- дополнительные горизонтальные перемещения фундамента;
- дополнительные вертикальные перемещения фундамента;
- дополнительные изгибающие моменты в сваях;

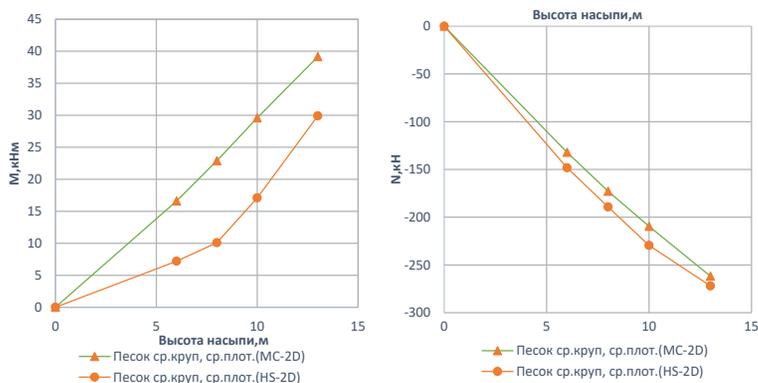


Рис. 2. Дополнительные внутренние усилия в сваях С15.35 [разработано автором].

- дополнительные продольные усилия в сваях;
- возникновение негативного трения на сваях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Исходя из анализа было выявлено, что основными параметрами, влияющими на получаемые результаты, являются:

- размеры расчётной области по вертикальной оси;
- длина свай;
- заглубление ростверка;
- тип постановки (плоская/пространственная);
- математическая модель, описывающая поведение грунта (Кулона-Мора / Hardening Soil); последняя модель наиболее корректно отражает поведение грунта при взаимодействии со свайей<sup>5</sup>.

### Анализ результатов в плоской постановке

При увеличении расчётной модели абсолютные значения горизонтальных перемещений увеличиваются, а максимальное значение смещается ниже к краю расчётной модели. Применение упругопластической модели упрочняющегося грунта минимизирует этот фактор, но не отменяет его. Разница в дополнительных изгибающих моментах может достигать до 40 %. В сваях меньшей длины дополнительные изгибающие моменты больше, а продольные усилия меньше. Ввиду незначительных значений изгибающих моментов стоит уделить большее внимание продольным

усилиям, что говорит о том, что сваи большей длины подвержены большему влиянию. При увеличении глубины заложения ростверка изменяется распределение давления на ростверк и сваи, в результате уменьшаются как моменты, так и продольные силы. Полученные зависимости перемещений и усилий в сваях от модели грунта показаны на графиках (рис. 2 и 3).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что упругопластическая модель упрочняющегося грунта показывает заметное уменьшение изгибающих моментов и горизонтальных перемещений по сравнению с моделью Кулона-Мора, в то время как продольные усилия и дополнительные осадки остаются в одинаковых пределах.

При выполнении исследования был зафиксирован фактор появления «негативного трения» на боковой поверхности свай мостовой опоры. Отрицательное трение возникает в результате того, что осадка грунта свайного фундамента под действием влияния строительства АГПС больше, чем осадка самого фундамента (рис. 4 а, б, в). В этом случае грунт около свай нависает на них, а дополнительная нагрузка прибавляется к внешней нагрузке, приложенной к сваям. Согласно правилам расчета несущей способности, касательные силы, действующие в сторону направления осадки, требуется брать со знаком «-». Данный фактор оказывает существенное влияние на несущую способность и приводит к увеличению продольных сил [15, С. 1425; 16, С. 48; 17, С. 196]. По характеру эпюры касательных напряжений в свайных интерфейсах видно, что MIDAS FEА NX учитывает негативное трение. На рис. 4 в видно, что негативное трение от давления насыпи действует только до опреде-

<sup>5</sup> Мельников Р. В. Использование метода конечных элементов в геотехнике: Учеб. пособие. – М.: Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 188 с. ISBN 978-5-9729-0697-0.



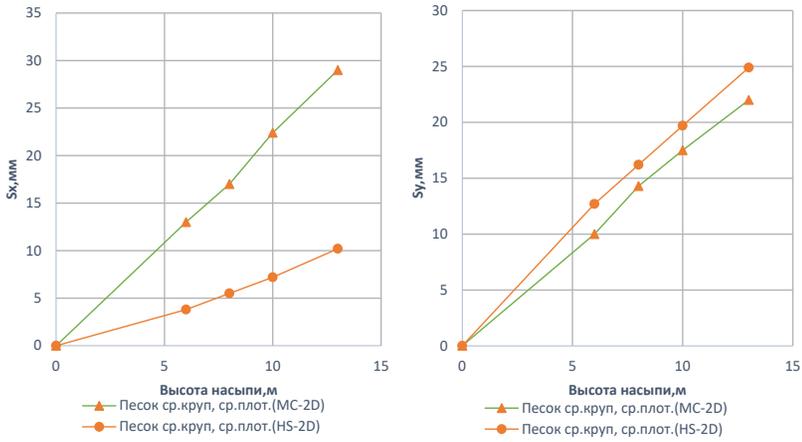


Рис. 3. Дополнительные перемещения в сваях C15.35 [разработано автором].

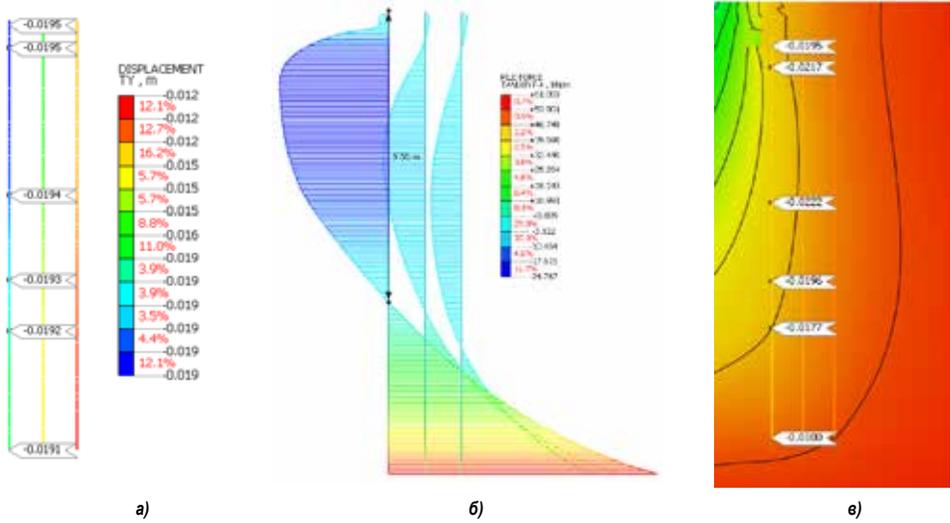


Рис. 4. а) осадка грунтового массива, б) осадка свайного фундамента, в) касательные напряжения в свайных интерфейсах [результаты расчёта в MIDAS FEA NX, разработано автором].

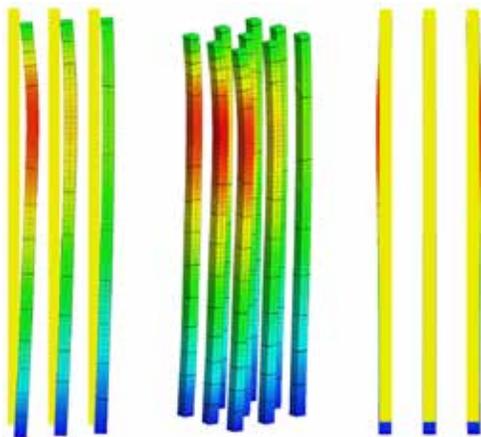


Рис. 5. Деформированный вид свайного фундамента [результаты расчёта в MIDAS FEA NX, разработано автором].

лённой глубины – «нейтральной оси», положение которой можно определить из численного расчёта. В специализированных программных комплексах данное явление учитывается автоматически, в аналитических же расчётах или при использовании других способов решения данный фактор требуется учитывать вручную.

**Анализ результатов в пространственной постановке**

В результате проведённых численных экспериментов в трёхмерной постановке было установлено, что поведение свайного фундамента под влиянием строительства АГПС намного сложнее и требует тщательного анализа в каждом отдельном случае. На рис. 5

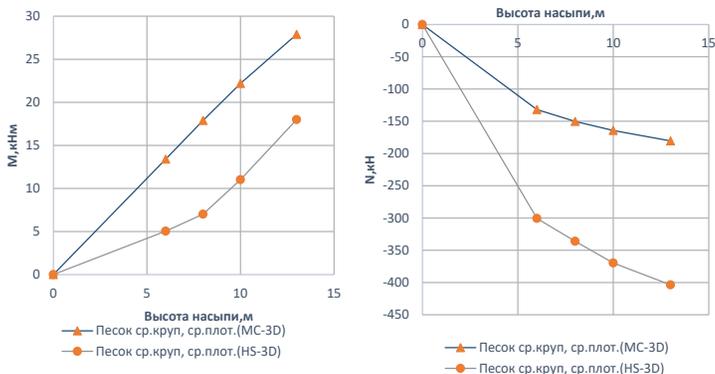


Рис. 6. Дополнительные внутренние усилия в сваях С15.35 [разработано автором].

изображены деформации свайного фундамента. На рис. 6 и 7 представлены полученные зависимости перемещений и усилий в сваях от модели грунта в пространственной постановке.

Отчётливо видно, что дополнительный изгиб наблюдается только на 1/3 длины сваи, при этом большему изгибу подвержены сваи переднего ряда, что является интуитивно понятным, исходя из распространения дополнительных напряжений в массиве грунта. Движение массива грунта в межсвайном пространстве приводит к изгибу крайних свай в другой проекции, что говорит о сложном напряжённо-деформированном состоянии фундамента опоры.

Полученные зависимости демонстрируют значительное расхождение в результатах между используемыми моделями поведения грунта, что требует отдельного исследования.

В пространственной постановке изменение высоты расчётной модели не оказывает существенного влияния на получаемые результаты. Значения изгибающих моментов уменьшаются по сравнению с плоской задачей.

Продольные усилия, напротив, увеличиваются. Данный эффект можно объяснить тем, что более точно описывается поведение свай по боковой поверхности, так как моделируется весь твердотельный объём, а программный комплекс определяет касательные силы, реализующиеся по боковой поверхности, в автоматическом режиме. Абсолютные значения перемещений снизились.

### ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Полученные экспериментальные результаты можно суммировать и вынести на обсуждение в виде следующих заключений.

1. Влияние на свайное основание устоя от строительства АГПС выражается в дополнительных изгибающих моментах, продольных усилиях, вертикальных и горизонтальных перемещениях.

2. При строительстве рядом со свайным фундаментом АГПС большой высоты может возникнуть негативное трение по боковой поверхности свай, что может привести к снижению несущей способности свай по грунту.

3. Балочные конечные элементы являются идеализированными моделями, и их сечение

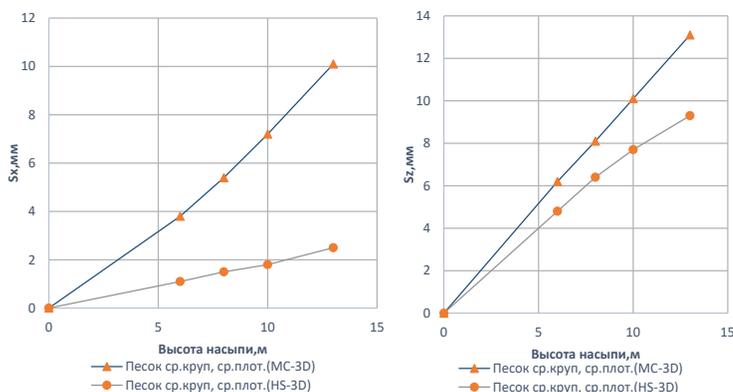


Рис. 7. Дополнительные перемещения в сваях С15.35 [разработано автором].



учитывается не совсем корректно, из-за этого продольные усилия могут быть определены не корректно.

4. Дополнительные внутренние усилия зависят от используемой модели поведения грунта.

5. Высота расчётной модели влияет на получаемые результаты в плоской постановке и практически не влияет в пространственной.

6. При проектировании устоя с отдельными функциями требуется совместно вести расчёт и проектирование АГПС и фундамента устоя.

Разделение на два независимых расчёта может привести к получению некорректных результатов и повреждению фундаментов в будущем, что существенно снизит безопасность и надёжность мостового сооружения. Для того чтобы избежать подобных проблем, при проектировании необходимо учитывать влияние подпорных стен на свайные фундаменты. Для решения данной проблемы необходимо обеспечить координацию между специалистами, занимающимися расчётами фундамента устоя и АГПС.

В целом, правильное проектирование фундаментов и подпорных стен является одним из важнейших аспектов в создании надёжных и безопасных сооружений. Для этого необходимо учитывать все возможные факторы влияния и производить проектирование с их учётом.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Соколов А. Д. Армогрунтовые системы автодорожных мостов и транспортных развязок: Монография. – СПб.: ООО Отраслевая медиа-корпорация «Держава», 2013. – 504 с. ISBN 978-5-7937-0901-0.

2. Тарасов А. А. Проектирование мостовых устоев из армированного грунта // Строительная механика и конструкции. – 2012. – № 2 (5). – С. 70–76. EDN: PJEPYR.

3. Зернина Е. В. Расчёт армогрунтовой подпорной стенки для обеспечения устойчивости склона // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2019. – Т. 1. – С. 57–64. EDN: QGVUDT.

4. Шапиро Д. М., Тарасов А. А. Расчет устойчивости устоев и конусов мостовых сооружений // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2012. – № 2 (26). – С. 146–153. EDN: OXPZDT.

5. Сотников С. Н., Симагин В. Г., Вершинин В. П. Проектирование и возведение фундаментов вблизи су-

ществующих сооружений / Под ред. С. Н. Сотникова. – М.: Стройиздат, 1986. – 96 с. [Электронный ресурс]: <https://djvu.online/file/QJwv7yYkzzFgH?ysclid=lmronkdpaf472884850>. Доступ 18.05.2023.

6. Глотов Н. М., Луга А. А., Силин К. С., Завриев К. С. Свайные фундаменты. – М.: Транспорт, 1975. – 432 с. [Электронный ресурс]: <https://elima.ru/books/?id=1982&ysclid=lmro8al8w147138415>. Доступ 18.05.2023.

7. Нуждин Л. В., Михайлов В. С. Методы построения моделей и расчета системы «свайный фундамент – грунтовое основание» в SCAD Office и Smath Studio // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2020. – № 5 (737). – С. 42–52. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-737-5-42-52.

8. Шапиро Д. М. Теория и расчётные модели оснований и объектов геотехники: Монография. – Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2012. – 164 с. ISBN 978-5-905654-70-1.

9. Sharma, V. J., Vasanvala, S. A., Solanki, C. H. Behaviour of Load-Bearing Components of a Cushioned Composite Piled Raft Foundation Under Axial Loading. Slovak Journal of Civil Engineering, 2014, Vol. 22, Iss. 4, pp. 25–34. DOI: 10.2478/sjce-2014-0020.

10. Schanz, T., Vermeer, P. A., Bonnier, P. G. The hardening soil model: Formulation and verification. In: Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Balkema, Rotterdam, 1999, pp. 281–296. DOI: 10.1201/9781315138206-27.

11. Захарова Т. М., Черепанов Б. М. Обзор программных комплексов Midas GTS NX и PLAXIS 3D для решения проектных задач при расчете свайных фундаментов // Ползуновский альманах. – 2023. – № 1. – С. 34–37. EDN: IHOQLI.

12. Купчикова Н. В., Сычков А. Н. Результаты численного анализа системы «здание – свайный фундамент – грунтовое основание» с помощью «MIDAS GTS NX» // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 1 (35). – С. 19–24. EDN: SZIVGB.

13. Фадеев А. Б. Параметры модели упрочняющегося грунта программы «Plaxis» // Численные методы расчетов в практической геотехнике: Сб. статей международной научно-техн. конференции. – СПб.: СПбГАСУ, 2012. – 398 с. – С. 13–20. ISBN 978-5-9227-0318-5.

14. Алехин В. С. Взаимодействие свай в составе групп и определение предельного сопротивления основания / Дисс... канд. техн. наук. – М.: РУТ, 2020. – 147 с.

15. Znamenskii, V. V., Hegazy, O. M. A comparative study of ordinary piles and superlong piles in consolidating soil. Journal of Physics: Conference Series, 2019, Vol. 1425, Iss. 1, art. 012071. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012071.

16. Акоюн В. Ф., Кондрик И. В., Самсонов О. В. Моделирование отрицательных сил трения при реализации просадочных свойств грунта. // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 1. – С. 48–54. [Электронный ресурс]: [http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_40\\_akopyan\\_kondrik\\_samsonov.pdf\\_aa673c493e.pdf](http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_40_akopyan_kondrik_samsonov.pdf_aa673c493e.pdf). Доступ 29.07.2023.

17. Знаменский В. В., Ле Тхюй Зьонг. Влияние процесса водопонижения на развитие сил отрицательного трения по боковой поверхности сваи // Инновации и инвестиции. – 2022. – № 4. [Электронный ресурс]: <https://www.innovazia.ru/upload/iblock/f3b/se3tpz3oxz7i2tm8uat40hz9meee9c1lu/%E2%84%964%202022%20%D0%98%D0%B8%D0%98.pdf> [полный текст выпуска]. Доступ 29.07.2023. ●

### Информация об авторе:

**Збрыський Михаил Тарасович** – магистрант кафедры механики грунтов и геотехники Московского государственного строительного университета, Москва, Россия, [Zmt.work@mail.ru](mailto:Zmt.work@mail.ru).

Статья поступила в редакцию 13.06.2023, одобрена после рецензирования 13.10.2023, принята к публикации 15.11.2023.