

УДК 624.138

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-70-79](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-70-79)

EDN: IJDSVY

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗОК ПРИ УСИЛЕНИИ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ НАГЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ ТРУБЧАТЫХ ВИНТОВЫХ ШТАНГ НА ИХ НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

А.И. ХАРИЧКИН^{1,2}, канд. техн. наук

Д.Д. БАБИЧ^{1,2,✉}

И.М. ГАЛИМОВ^{1,2}, канд. техн. наук

Д.В. ЧЕРНЯТИН^{1,2}

¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

² Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Взаимодействие нагелей с грунтовым основанием представляет большой интерес для специалистов-геотехников. Метод повышения устойчивости оползневых склонов грунтовыми нагелями зарекомендовал себя как достаточно универсальный и экономически эффективный. Однако процесс разработки проектных решений с применением нагелей выполняется с использованием эмпирических и полумэмпирических методов, которые не учитывают влияние отдельных параметров нагрузок при усилении оползневых склонов нагелями на основе трубчатых винтовых штанг на их несущую способность и прочностные характеристики.

Целью работы является вычисление наиболее эффективного угла заложения нагелей в откосе, а также определение характеристик перемещения грунта оползневого склона по потенциальной поверхности скольжения и их влияния на несущую способность нагеля и его прочностные характеристики.

Материалы и методы. Выполнен обзор одиннадцати научных источников по исследованиям влияния параметров нагрузок при усилении оползневых склонов нагелями на основе трубчатых винтовых штанг на их несущую способность и прочностные характеристики. Для анализа отбирались источники, наиболее близкие к теме исследования. При проведении расчета использовался программный комплекс PLAXIS 2D.

Результаты. По результатам расчета и анализа литературы были сделаны выводы об оптимальном угле заложения нагелей в откосе, который соответствует значению в диапазоне от 0° до 5° к горизонту. Также исследование показало, что развитие сдвиговых напряжений вдоль нагеля происходит неравномерно во времени, а допущение о постоянном значении сдвиговых напряжений по всей длине нагеля или корня анкера может привести к завышению значения несущей способности по грунту.

Выводы. Полученные результаты показали, что изучение влияния параметров нагрузок при усилении оползневых склонов нагелями является актуальной темой и подтверждает необходимость ее дальнейшего детального исследования.

Ключевые слова: нагель, грунтовой массив, склон, откос, устойчивость, несущая способность, грунтовой анкер, противооползневая защита, свая, микросвая, трубчатая винтовая штанга, ТВШ, нагельное поле, численное моделирование

Для цитирования: Харичкин А.И., Бабич Д.Д., Галимов И.М., Чернятин Д.В. Влияние параметров нагрузок при усилении оползневых склонов нагельми на основе трубчатых винтовых штанг на их несущую способность и прочностные характеристики. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;40(1):70–79. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-70-79](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-70-79)

Вклад авторов

Харичкин А.И., Галимов И.М. – идея, концепция исследования, научное руководство, написание статьи. Бабич Д.Д., Чернятин Д.В. – сбор и анализ материалов, выполнение расчетов, формирование выводов, написание статьи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 09.02.2024

Поступила после рецензирования 27.02.2024

Принята к публикации 05.03.2024

INFLUENCE OF LOAD PARAMETERS DURING LANDSLIDE SLOPE REINFORCEMENT WITH SOIL NAILS BASED ON SELF-DRILLING HOLLOW STEEL BARS ON THEIR BEARING CAPACITY AND STRENGTH PROPERTIES

A.I. KHARICHKIN^{1,2}, Cand. Sci. (Engineering)

D.D. BABICH^{1,2,✉}

I.M. GALIMOV^{1,2}, Cand. Sci. (Engineering)

D.V. CHERNYATIN^{1,2}

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

² Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy ave., 59, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. Soil nails are widely used to reinforce landslide slopes and ground-retaining structures in many countries, including Russia. The interaction of soil nails with the soil base is of high interest to both engineers and researchers. The method of increasing the stability of landslide slopes with soil nails has proved to be versatile and cost-effective. However, the process of designing soil nails is usually carried out using empirical and semi-empirical methods that may ignore a number of important factors.

Aim. To determine the most optimal angle of soil nail inclination, as well as to analyze the characteristics of soil movement of a landslide slope along a potential sliding surface and their influence on the bearing capacity of the soil nail and its strength characteristics.

Materials and methods. A review of scientific publications on the influence of load parameters during landslide slope reinforcement with soil nails based on self-drilling hollow steel bar on their bearing capacity and

strength properties was carried out. The review sample included 11 publications most relevant to the topic under study. Calculations were carried out using the PLAXIS 2D software environment.

Results. The conducted calculations and literature review allowed the optimal angle of soil nail inclination in the slope to be established, which corresponds to a value ranging from 0° to 5° to the horizon. The study also showed that the development of shear stresses along the soil nail in time exhibits a non-uniform nature. Therefore, the assumption of a constant value of shear stresses along the entire length of the nail or anchor root can lead to an overestimation of the soil bearing capacity.

Conclusions. The obtained results have confirmed the relevance of further research into the influence of load parameters during the reinforcement of landslide slopes using soil nails.

Keywords: soil nail, soil mass, slope, stability, bearing capacity, ground anchor, reinforcement, pile, micropile, hollow steel bar, self-drilling rod, soil nails field, numerical modeling

For citation: Kharichkin A.I., Babich D.D., Galimov I.M., Chernyatin D.V. Influence of load parameters during landslide slope reinforcement with soil nails based on self-drilling hollow steel bars on their bearing capacity and strength properties. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;40(1):70–79. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-70-79](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-70-79)

Author contribution statements

Kharichkin A.I., Galimov I.M. – idea, research concept, scientific supervision, article writing.

Babich D.D., Chernyatin D.V. – collecting and analyzing materials, performing calculations, forming conclusions, article writing.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 09.02.2024

Revised 27.02.2024

Accepted 05.03.2024

Введение

Проблема оползневой опасности широко распространена во всем мире. Высокая стоимость возведения подпорных стен для удержания оползневых склонов привела к необходимости разработки других методов. Одним из них является метод армирования грунтового массива склонов с помощью нагельных полей.

Устройство грунтовых нагелей – это метод стабилизации грунта, который используется для усиления неустойчивых склонов природного или техногенного сложения. Этот подход также используется для безопасного увеличения крутизны грунтового массива склонов. При этом методе стабилизации склонов в грунтовый откос устанавливается относительно тонкий армирующий элемент. Нагели обычно представляют собой стальные стержни или трубы, армирующие элементы из композитных материалов или наиболее часто применяемые железобетонные элементы. Выбор материала производится в зависимости от требований и условий устройства.

Важным фактором при устройстве нагельных полей является угол заложения нагеля. Специалисты до сих пор дискутируют о влиянии угла заложения нагеля на его несущую способность и устойчивость грунтового массива [1]. Также требует оценки вопрос влияния изгиба нагеля под воздействием поперечных сил, вызванных движением оползневого тела [2].

Состояние вопроса

В статье [1] исследовалось влияние углов заложения нагелей на изменение величин выдергивающих усилий, возникающих в них при усилении оползневых склонов. Расчет склона был произведен для трех углов откоса (45° , 63° и 80°) с применением упругопластической грунтовой модели Мора – Кулона. Нагели в расчетной модели располагались в пять рядов с углами заложения 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° к горизонтали.

На рис. 1 представлены графики распределения выдергивающих усилий для четвертого нагеля при различных углах заложения нагелей и углах откоса.

В статье [2] предложена математическая модель для моделирования процесса передачи нагрузки на контакте нагеля и окружающего грунта.

Принято, что нагели работают преимущественно на растяжение, но в них также возникают сдвиговые усилия и изгиб на границе поверхности скольжения (рис. 2а). В условиях эксплуатации изгибом обычно пренебрегают. Однако по мере приближения к потере устойчивости склона вклад изгиба становится более значительным. Изгиб также может влиять на нормальное давление по длине нагеля и, следовательно, на сопротивление сдвигу по контакту нагеля и грунта. На рис. 2б показано, что изгиб нагеля способствует развитию нормальных и сдвиговых напряжений вокруг нагеля. Однако вклад изгиба нагеля в сопротивление сдвигу по контакту нагеля и грунта не исследовался. Предложено оценивать влияние изгиба нагеля в процессе роста деформаций грунта в откосе.

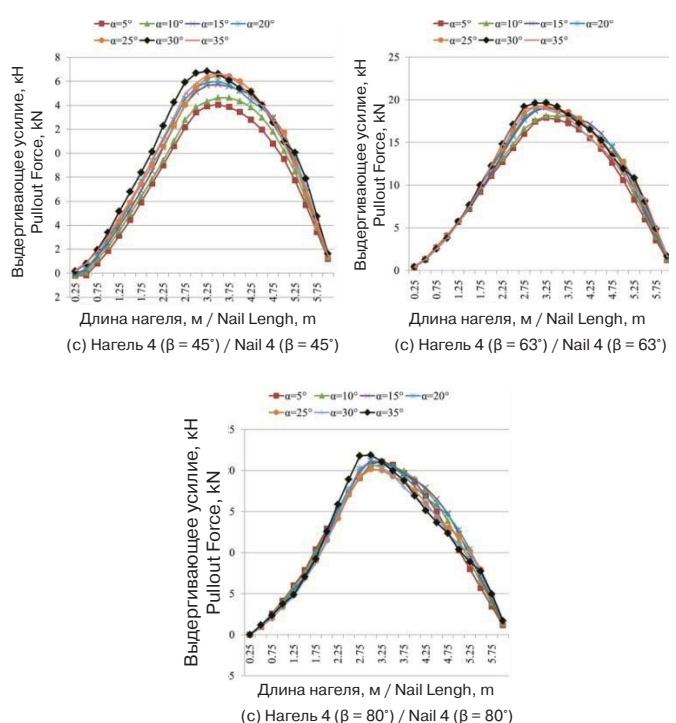


Рис. 1. Графики распределения выдергивающих усилий для четвертого нагеля при различных углах его заложения и углах откоса

Fig. 1. Plots of pullout force distribution for the fourth soil nail at its different inclination and slope angles

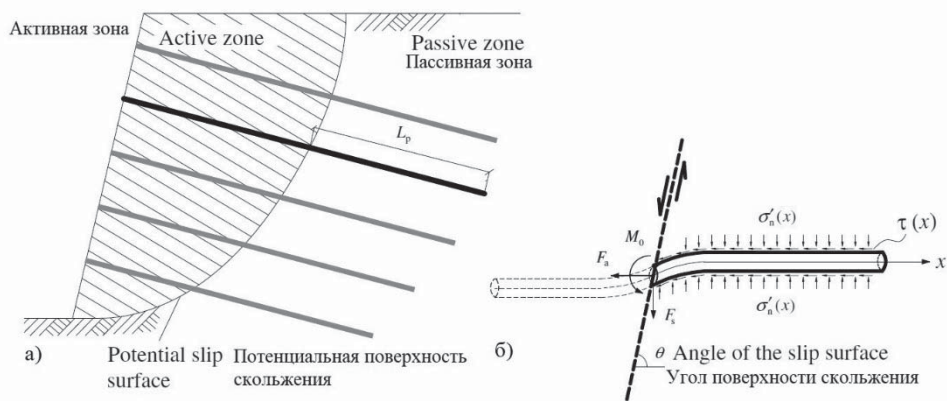


Рис. 2. Характер разрушения склона: а – склон, армированный нагелями; б – локальное разрушение нагеля в склоне
Fig. 2. Nature of slope failure: а – slope reinforced with soil nails; б – local failure of a soil nail in the slope

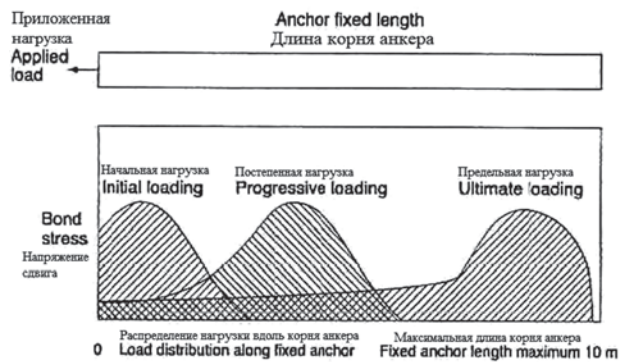


Рис. 3. Неравномерное распределение сдвиговых напряжений вдоль корня анкера
Fig. 3. Uneven distribution of shear stresses along the anchor root

В работе [3] ученые из Технического университета в Брно исследовали поведение грунтовых анкеров в мелкозернистых песках под действием нагрузок и перемещений.

Ими установлено, что развитие сдвиговых напряжений вдоль корня грунтовых анкеров происходит неравномерно во времени. На первых этапах нагружения напряжения сдвига, возникающие на контакте «грунт – анкер», концентрируются в начальной части корня анкера. После достижения пикового значения напряжение сдвига последовательно уменьшается до остаточного значения. Пиковое сдвиговое напряжение перемещается вдоль анкера, как схематично показано на рис. 3. Подобное пиковое распределение напряжения сдвига вдоль анкера было экспериментально подтверждено несколькими авторами: Остермайер [4], Шееле [5], Барли [6], Вудс и Баркхордари [7]. Описанное явление оказывает серьезное влияние на предельное сопротивление грунтовых анкеров и на графики зависимости перемещения от нагрузки. Предельная несущая способность анкера по грунту не прямо пропорциональна длине корня анкера.

Поскольку максимальное напряжение сдвига достигается только на небольшом участке корня анкера, то анкеры с длиной корня более 8 м неэффективны (Барли [8]). Допущение

о постоянном значении сдвиговых напряжений по всей длине корня анкера может привести к завышению значения несущей способности.

Расчетная оценка устойчивости склона, усиленного нагелями

В настоящее время устройство нагелей при усилении оползневых склонов является достаточно распространенным методом. При этом многие вопросы и параметры остаются за рамками проектирования. Для оценки коэффициентов устойчивости склона до и после усиления нагелями был выполнен расчет в программном комплексе PLAXIS 2D.

В качестве расчетной модели был принят склон с углом откоса, равным 40° (рис. 4). Расчеты производились с применением упругопластической грунтовой модели Мора – Кулона. Были приняты следующие расчетные физико-механические характеристики для грунта: $\gamma = 2,66 \text{ г/см}^3$; $C = 0,002 \text{ МПа}$; $\varphi = 38^\circ$; $E = 20,5 \text{ МПа}$; $\nu = 0,29$.

При проведении расчетов было принято пять рядов нагелей длиной 10 м и диаметром 120 мм со следующими вариантами угла заложения (рис. 5):

- I – угол заложения всех нагелей – 30° к горизонту;
- II – горизонтальное положение всех нагелей;
- III – каждый из пяти нагелей расположен перпендикулярно потенциальной поверхности скольжения.

Результаты расчетов представлены на рис. 6–8 и в таблице.

По представленным результатам расчетов можно сделать вывод, что величина выдергивающих усилий, возникающих в нагелях, имеет наименьшее значение при угле заложения, равном нулю, а наибольшее – при угле 30° . Проверку сопротивления нагелей по материалу необходимо выполнять на совместное действие N , M и Q .

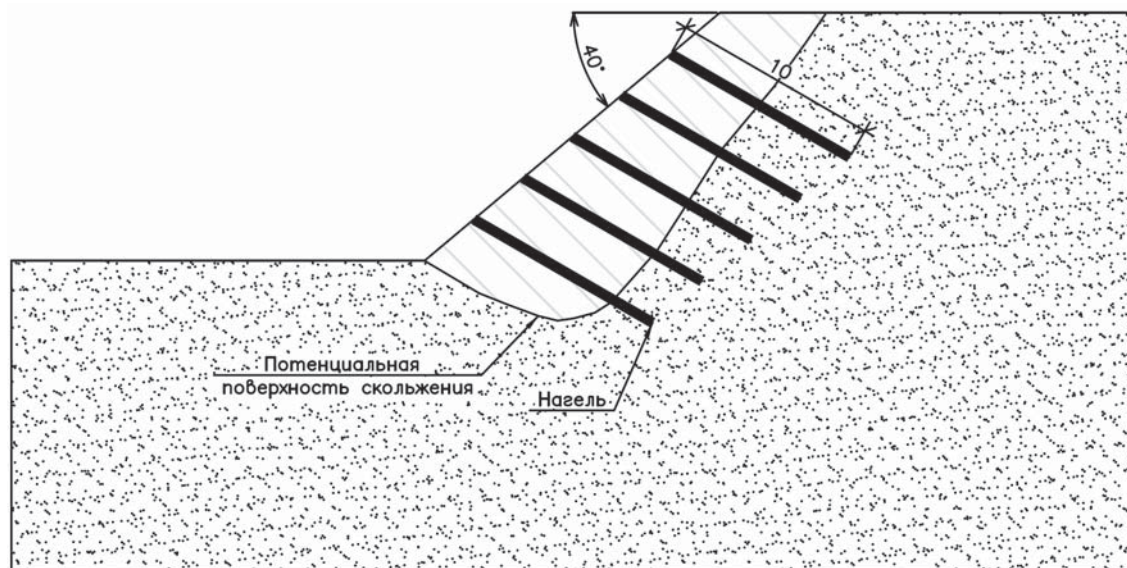


Рис. 4. Пример расчетной модели с углом заложения нагелей, равным 30°
Fig. 4. Example of a calculation model with a nail installation angle of 30°

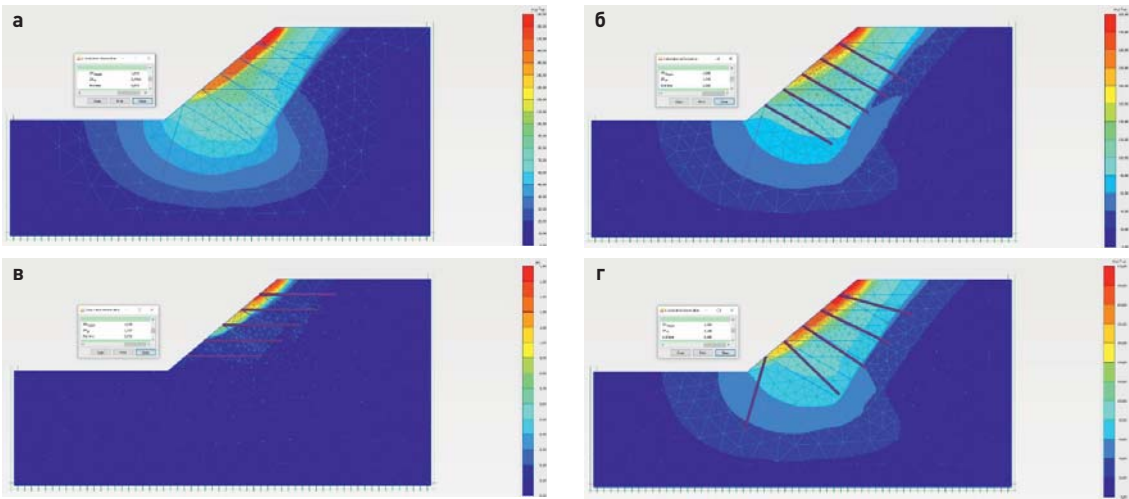


Рис. 5. Результаты расчета устойчивости для: а – склона в природном состоянии; б – склона, армированного нагелями по I варианту; в – склона, армированного нагелями по II варианту; г – склона, армированного нагелями по III варианту
Fig. 5. Results of stability calculations for: а – a slope in natural state; б – a slope reinforced with soil nails according to variant I; в – a slope reinforced with soil nails according to variant II; г – a slope reinforced with soil nails according to variant III

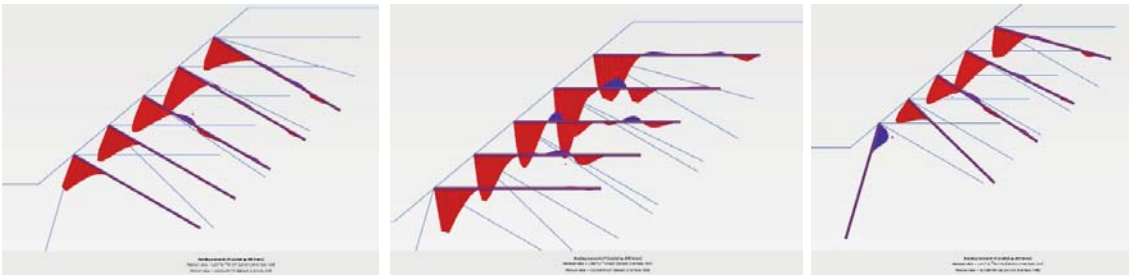


Рис. 6. Изгибающий момент в нагелях (три варианта угла заложения)
Fig. 6. Bending moment in soil nails (three variants of installation angle)

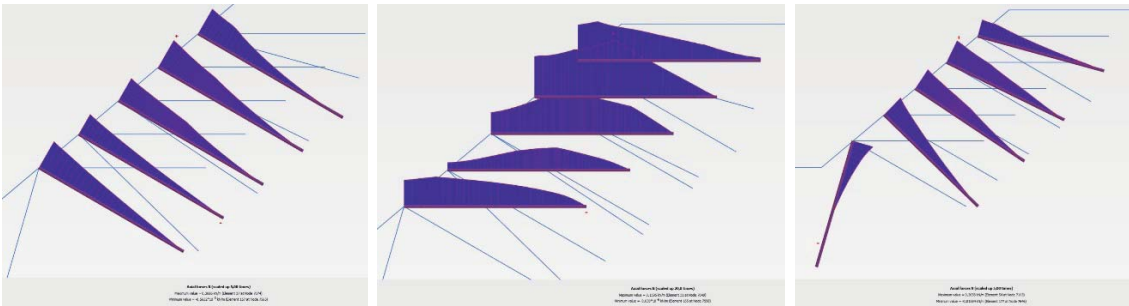


Рис. 7. Продольные усилия в нагелях (три варианта угла заложения)
Fig. 7. Longitudinal forces in soil nails (three variants of installation angle)

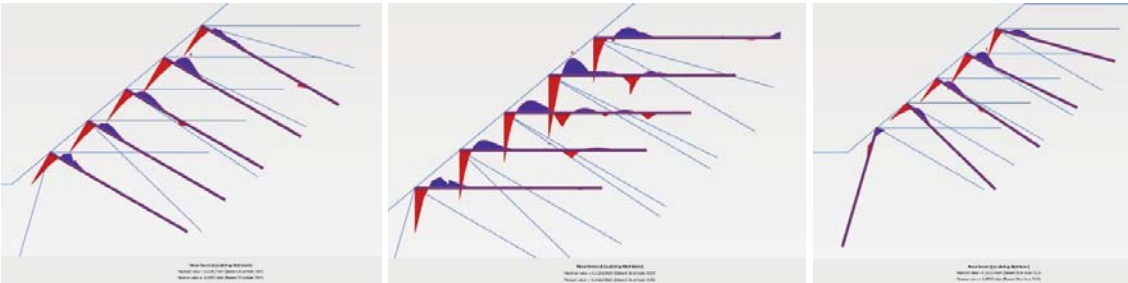


Рис. 8. Поперечные силы в нагелях (три варианта угла заложения)
Fig. 8. Transverse forces in soil nails (three variants of installation angle)

Таблица

Результаты расчетов

Table

Calculation results

Вариант угла заложения нагелей	Склон в природном состоянии	Склон, армированный нагелями			
	коэффициент устойчивости	максимальные значения усилий			
		<i>M</i> , кНм	<i>N</i> , кН/м	<i>Q</i> , кН/м	
I [30°]	0,9584	1,249	-0,017	0,369	-0,054
II [0°]		1,327	-0,021	0,159	-0,067
III [пер.]		1,168	-0,018	0,366	-0,057

Заключение

На основании анализа и данных научных источников и выполненного расчета можно сделать следующие выводы.

1. По результатам расчета наиболее высокое значение коэффициента устойчивости грунтового массива, усиленного нагелями, соответствует углу их заложения в диапазоне от 0° до 5° к горизонту.
2. Развитие сдвиговых напряжений вдоль нагеля происходит неравномерно во времени.
3. Допущение о постоянном значении сдвиговых напряжений по всей длине корня анкера может привести к завышению значения несущей способности по грунту.

Список литературы / References

1. Najafi N., Kalehsar R.I., Khodaei M., Dehghan A.N., Karroubi A. Effect of installation angle on pull-out resistance of nails in soil slopes. SN Applied Sciences. 2021;3:723. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04705-2>
2. Zhou W.-H., Yin J.-H. A simple mathematical model for soil nail and soil interaction analysis. Computers and Geotechnics. 2008;35(3):479–488. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2007.07.001>
3. Chalmovský J., Mica L. The load-displacement behaviour of ground anchors in fine grained soils. Acta Polytechnica CTU Proceedings. 2018;16:18–24. <https://doi.org/10.14311/APP.2018.16.0018>
4. Ostermayer H. Construction, carrying behaviour and creep characteristics of ground anchors. In: Diaphragm Walls & Anchorages. London: ICE Publishing; 1975, pp. 141–151.

5. *Scheele F.* Tragfähigkeit von Verpressankern in nichtbindigen Boden Neue Erkenntnisse durch Dehnungsmessungen im Verankerungsbereich. Technische Universität München; 1981.
6. *Barley A.D., Littlejohn S.* The single bore multiple anchor system. In: Ground anchorages and anchored structures. Proceedings of the international conference organized by the Institution of Civil Engineers and held in London, UK, on 20–21 March 1997. Thomas Telford Publishing; 1997, pp. 65–75.
7. *Woods R.I., Barkhordari K., Littlejohn S.* The influence of bond stress distribution on ground anchor design. In: Ground anchorages and anchored structures. Proceedings of the international conference organized by the Institution of Civil Engineers and held in London, UK, on 20–21 March 1997. Thomas Telford Publishing; 1997, pp. 55–64.
8. *Barley A.D.* Theory and practice of the single bore multiple anchor system. In: Anker in Theorie und Praxis. Proc. Int. Symposium. Salzburg; 1995, pp. 297–301.
9. *Gassler G.* Vernagelte gelandesprünge – tragverhalten und standsicherheit [PhD thesis]. University of Karlsruhe; 1987.
10. *Pedley M.J.* The performance of soil reinforcement in bending and shear [PhD Thesis]. University of Oxford; 1990.
11. *Sawicki A.* Mechanics of reinforced soil. Rotterdam, Brookfield, Vt: Balkema; 2000.

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Игоревич Харичкин, канд. техн. наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ; заведующий лабораторией механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: andrei.kharichkin@gmail.ru

Andrey I. Kharichkin, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, Moscow State University of Civil Engineering; Head of the Laboratory of Hazardous Natural and Technogenic Process Mechanics and Development of Engineering Protection Methods, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: andrei.kharichkin@gmail.ru

Данил Дмитриевич Бабич[✉], аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ; младший научный сотрудник лаборатории механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: danil.babich@gmail.com

Danil D. Babich[✉], Graduate Researcher, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, Moscow State University of Civil Engineering; Junior Researcher, Laboratory of Hazardous Natural and Technogenic Process Mechanics and Development of Engineering Protection Methods, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: danil.babich@gmail.com

Илья Мидхатович Галимов, канд. техн. наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ; научный сотрудник лаборатории механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: iljagalimov@mail.ru

Ilya M. Galimov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, Moscow State University of Civil Engineering; Researcher, Laboratory of Hazardous Natural and Technogenic Process Mechanics and Development of Engineering Protection Methods, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: iljagalimov@mail.ru

Дмитрий Владимирович Чернятин, аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ; младший научный сотрудник лаборатории механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты НИИОСП им. Н.М. Герсеева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: chernyatin94@mail.ru

тел.: +7 (926) 129-29-80

Dmitriy V. Chernyatin, Graduate Researcher, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, Moscow State University of Civil Engineering; Junior Researcher, Laboratory of Hazardous Natural and Technogenic Process Mechanics and Development of Engineering Protection Methods, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersyanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: chernyatin94@mail.ru

tel.: +7 (926) 129-29-80

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author