

УДК 624.046:624.154.9

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-80-91](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-80-91)

EDN: LUDLBQ

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ НАГЕЛЕЙ В ГРУППЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАКРЕПЛЯЕМОГО ГРУНТОВОГО МАССИВА

А.И. ХАРИЧКИН^{1,2}, канд. техн. наук

Д.В. ЧЕРНЯТИН^{1,2,✉}

И.М. ГАЛИМОВ^{1,2}, канд. техн. наук

Д.Д. БАБИЧ^{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. Укрепление откосов нагельными полями является наиболее экономичным и экологичным методом их стабилизации. Однако отсутствие теоретически обоснованных схем оптимального размещения нагелей в группе, подтвержденных испытаниями в различных условиях, приводит к неэффективному, зачастую избыточному применению материала при устройстве инженерной защиты.

Цель работы: определение наиболее эффективного расположения нагелей в группе с точки зрения общей устойчивости закрепляемого массива. Количественная оценка устойчивости в зависимости от шага и формы расстановки нагелей в группе.

Материалы и методы. Выполнен обзор зарубежной и отечественной литературы по проблеме оценки влияния размещения нагельных и анкерных групп при закреплении откосов. По результатам анализа состояния вопроса выполнен установочный расчет с использованием численного моделирования в программном комплексе PLAXIS 3D.

Результаты. Существующие исследования ограничены анализом влияния конфигурации групп винтовых анкеров и не учитывают использование нагелей цилиндрического сечения, что подчеркивает необходимость дальнейших комплексных исследований в этой области. По результатам установочного расчета, выполненного методом численного моделирования, проведено сравнение полученных коэффициентов устойчивости для пяти типов конфигурации нагельных групп. Результаты расчета подтверждают наличие зависимости, устойчивость откоса от конфигурации и количества нагелей в группе. Разница между коэффициентами устойчивости для многоугольной и треугольной трехрядной конфигураций составила 0,072 %, при этом многоугольная конфигурация требует на три единицы нагелей меньше. Так, выбор оптимальной расстановки нагелей может привести к увеличению эффективности противооползневых мероприятий и сокращению затрат.

Выводы. В данной статье подтверждается актуальность и важность изучения влияния конфигурации групп нагелей на устойчивость откосов, подчеркивается необходимость проведения более глубоких и комплексных исследований в этой области.

Ключевые слова: нагель, нагельное поле, конфигурация нагелей, грунтовый массив, склон, устойчивость откоса, несущая способность, грунтовый анкер, противооползневая защита, численное моделирование

Для цитирования: Харичкин А.И., Чернятин Д.В., Галимов И.М., Бабич Д.Д. Влияние конфигурации нагелей в группе на устойчивость закрепляемого грунтового массива. Вестник НИЦ «Строительство». 2024;40(1):80–91. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-80-91](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-80-91)

Вклад авторов

Харичкин А.И., Галимов И.М. – идея, концепция исследования, научное руководство, написание статьи.
Чернятин Д.В., Бабич Д.Д. – 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 06.02.2024

Поступила после рецензирования 01.03.2024

Принята к публикации 05.03.2024

INFLUENCE OF DOWEL GROUP CONFIGURATION ON THE STABILITY OF REINFORCED SLOPES

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

D.V. CHERNYATIN^{1,2,✉}

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

D.D. BABICH^{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. Slope reinforcement with dowels is the most economical and environmentally friendly method of their stabilization. However, the lack of theoretically substantiated schemes for optimal placement of dowels in groups, confirmed by tests in various conditions, leads to inefficient, often excessive use of the material in the arrangement of engineering protection.

Aim. To determine the most effective arrangement of dowels in groups with regard to the overall stability of the reinforced soil mass. To assess quantitatively the stability depending on the spacing and shape of dowels in the group.

Materials and methods. A review of international and Russian literature on the problem of assessing the influence of geometric parameters of dowel and anchor groups was carried out. According to the results of the review, primary calculations with the use of numerical simulation in the PLAXIS 3D software package was carried out.

Results. The available publications mainly analyze configurations of screw anchor groups, paying insufficient attention the use of dowels of cylindrical cross-section. This fact substantiates further research in this field. The conducted numerical simulation allowed the slope stability provided by five dowel group configurations to be compared. The calculation results show that the slope stability depends on the configuration and the number of dowels in the group. The difference between the stability factors for the polygonal and triangular three-row configuration was 0.072 %, with the polygonal configuration requiring three dowels less. Selection of optimal dowel placement contributes to increased landslide control efficiency and reduced costs.

Conclusions. The relevance and importance of studying the effect of dowel group configuration on slope stability, emphasizing the need for more in-depth and comprehensive research in this area.

Keywords: dowel, dowel field, dowel configuration, soil mass, slope, slope stability, bearing capacity, soil anchor, landslide protection, numerical simulation

For citation: Kharichkin A.I., Chernyatin D.V., Galimov I.M., Babich D.D. Influence of dowel group configuration on the stability of reinforced slopes. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;40(1):80–91. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-80-91](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-80-91)

Author contribution statements

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

Chernyatin D.V., Babich D.D. – data collection and analysis, performing numerical 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 06.02.2024

Revised 01.03.2024

Accepted 05.03.2024

Введение

Наиболее распространенным способом защиты территории от развития склоновых процессов является улучшение строительных свойств грунтового массива. В этом ряду особое место занимает армирование грунтов с помощью нагелей.

Грунтовый нагель – это горизонтальный или наклонный армирующий элемент или буринъекционная микросвая, устраиваемые без предварительного натяжения в грунтовом откосе или в вертикальной стене выемки по мере ее разработки, а также в естественном склоне для повышения его устойчивости и уменьшения активного давления. Обычно нагели устанавливаются группами, образуя нагельное поле, которое взаимодействует с грунтом, формируя армированный массив.

Эффективное применение данного метода ограничено отсутствием достаточно разработанной методики расчета устойчивости армогрунтовых массивов. Трудности связаны с описанием напряженно-деформированного состояния таких массивов и малым числом исследований взаимодействия групп армирующих конструкций с грунтом.

Важным вопросом является отсутствие обоснованных схем оптимального размещения нагелей в группе, а также параметров их заложения в различных грунтовых условиях. Сохраняется проблема отсутствия единого подхода в расчетах укрепления откосов нагельными.

Состояние вопроса

Укрепление склонов при помощи нагельных полей, в отличие от многих других методов, которые требуют дорогостоящих работ по подрезке склонов или строительству массивных подпорных стен, является экономически выгодным и эффективным решением. Применение нагелей практически не оказывает воздействия на окружающую среду и природные ландшафты, что позволяет сохранить их в естественном состоянии.

Существуют два основных способа устройства нагельных конструкций в грунтовом массиве. Первый предполагает забивку, вдавливание или завинчивание готовых армирующих элементов. Второй предусматривает проходку горизонтальных или наклонных скважин для последующего формования в них нагелей с использованием инъекционных технологий.

Нагельное крепление, осуществляемое с использованием второго метода, включает следующие этапы: бурение скважины, установка стального или стеклопластикового стержня, инъектирование скважины.

На склонах, где границы потенциального тела оползня могут образовывать большие по площади участки, требующие надежного закрепления, используются нагели, объединенные в группы. Нагельное поле состоит из нескольких ярусов нагельных рядов, количество которых зависит от высоты закрепляемого откоса. При проектировании нагельных полей важными являются следующие параметры: конструкция и длина нагелей, расстояние между ярусами, шаг нагелей в ярусе, расположение нагелей в группе, угол наклона нагелей к горизонту, диаметр скважин, толщина защитного покрытия, угол откоса.

В работе [1] и СТО НОСТРОЙ 2.5.126-2013 [2] изложен практический опыт по применению нагельных креплений откоса.

При расчете и выборе параметров нагельного крепления откоса согласно СТО НОСТРОЙ 2.5.126-2013 [2] следует учесть несколько ограничений. Во-первых, длина нагелей должна зависеть от высоты откоса или глубины котлована и составлять от 40 до 80 % от высоты. Расстояние между ярусами, шаг нагелей и параметры сетки их размещения должны быть от 0,5 м для погружных нагелей и до 1,5 м для буроинъекционных нагелей. Угол наклона нагелей к горизонту должен быть в пределах от 0° до 30°, а диаметр скважин для буроинъекционных нагелей – от 60 до 170 мм. Угол откоса от вертикали должен находиться в интервале от 0° до 30°, а толщина защитного покрытия должна быть от 50 до 150 мм. Важно отметить, что все эти ограничения введены исходя из практического опыта, но не имеют теоретического обоснования.

В исследовании [3] приводятся результаты эксперимента в лотке по измерению степени осадки грунтового массива на неармированном и армированном грунтовыми нагелями откосе. Для этого был изготовлен прямоугольный лоток размером $0,60 \times 0,40 \times 0,30$ м из фанеры. В качестве модели грунтовых нагелей для укрепления откоса были использованы полые алюминиевые трубки диаметром 10 мм и длиной 16 см. Деформации, возникающие в грунте и армирующих элементах, оценивались с помощью тензометрических датчиков струнного типа. Для создания нагрузки на верхнюю часть откоса использовалась опорная стальная плита размером $0,16 \times 0,08 \times 0,035$ м. Регистрация осадки грунтового массива откоса выполнялась с помощью индикатора часового типа. Грунт в эксперименте представлен неоднородным песком с $\varphi = 31^\circ$.

Сначала был испытан грунтовый откос без армирования и определена его осадка от приложенной нагрузки. Затем был испытан грунтовый откос с установленными под разными углами (0°, 15° и 30°) нагелями. Без армирования конечная осадка откоса составила 6,75 мм при максимальной нагрузке в 1020 Н. После того как было выполнено армирование, конечная осадка грунтового откоса уменьшилась, приняв большую нагрузку по сравнению с неармированным грунтовым откосом. Как показано на графике (рис. 1), по мере увеличения наклона нагелей оседание также увеличивается, а несущая способность склона снижается. При наклоне нагелей 0°, 15° и 30° конечная осадка грунтового склона составила 5,19; 5,75 и 6,08 мм при нагрузке разрушения 1560, 1500 и 1460 Н соответственно.

Таблица максимальных нагрузок и осадок при разных значениях углов заложения нагелей		
Угол заложения нагелей	Максимальная нагрузка, N	Максимальные осадки, мм
Неармированный	1020	6,75
0°	1560	5,19
15°	1500	5,75
30°	1460	6,08

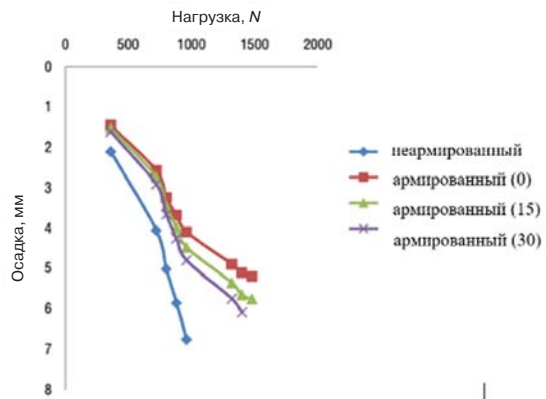


Рис. 1. График зависимости осадки от нагрузки для разных углов заложения нагелей
Fig. 1. Load-dependent settlement graph for different embedment angles of dowels



Рис. 2. Конфигурация нагелей при эксперименте
Fig. 2. Dowel configuration in the experiment

водился в лотке с размерами 100 × 30 × 60 см, передняя и задняя стенки которого были изготовлены из прозрачного оргстекла. Схема лотка и его фото перед началом испытаний показаны на рис. 4.

Для испытания использовался сухой неоднородный песок.

В эксперименте использованы следующие типы анкеров:

- однолопастные винтовые анкеры (маленькие квадратные и круглые плитные анкеры);
- двухлопастные винтовые анкеры (средние квадратные и круглые плитные анкеры);
- трехконтурные винтовые анкеры (большие квадратные и круглые плитные анкеры).

В табл. 1 и на рис. 5 представлены основные параметры сравниваемых анкеров. Длина стержня анкера составляет 300 мм для плитных и 375 мм для винтовых анкеров.

Расстояние по горизонтали принято между анкерами 150 мм. На подпорной стенке анкеры располагались в различных конфигурациях: квадратная, ромбовидная и конвертная (рис. 4).

В испытаниях было изучено влияние на осадку грунтового массива откоса различных по форме групп нагелей. Сравнивались следующие формы: квадратная, ступенчатая и ромбовидная, – как показано на рис. 2.

В случае ступенчатого расположения нагелей осадка была меньше, чем в случае квадратной и ромбовидной конфигурации. На рис. 3 показано, что максимальная осадка составила 5,19; 6,05 и 4,75 мм при нагрузке 1560, 1420 и 1600 Н для квадратной, ромбовидной и ступенчатой формы соответственно.

В результатах исследований отсутствует схема деформации откоса с нагелями и без нагелей, что не позволяет оценить влияние конфигурации на устойчивость массива.

Большинство научных исследований в области изучения воздействия конфигураций армирующих элементов рассматривают данный вопрос, используя винтовые анкеры. Полученный опыт и результаты таких исследований могут быть применены для решения проблемы с закреплением откоса при помощи нагелей.

Одной из таких работ, которую хотелось бы осветить, является статья [4]. В ней приводятся результаты испытания масштабной модели крепления выемки стенкой с различными типами винтовых анкеров. Масштаб модели был принят 1:10. Эксперимент про-

Таблица максимальных нагрузок и осадок при разной форме групп нагелей

Форма групп нагелей	Максимальные нагрузки, N	Максимальные осадки, мм
Неармированный	1020	6,75
Квадратная	1560	5,19
Ромбовидная	1420	6,05
Ступенчатая	1600	4,75

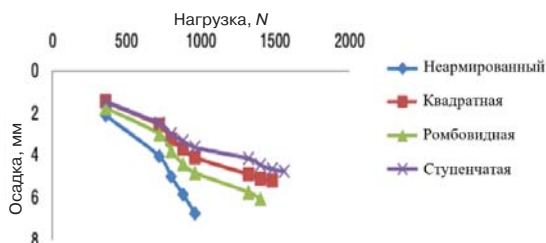


Рис. 3. График зависимости перемещений от нагрузки для разных форм групп нагелей

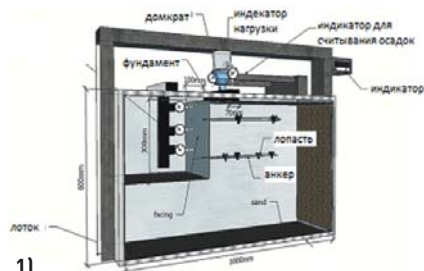
Fig. 3. Load-dependent displacement graph for different configurations of dowel groups

В 10 см от стены был установлен ленточный фундамент, и через домкрат на него подавалась вертикальная нагрузка. С помощью индикаторов часового типа следили за перемещениями и осадками. Во всех испытаниях использовался метод постоянной деформации для достижения максимальной точности при постоянной скорости нагружения. Регистрация данных производилась после каждого смещения по вертикали фундамента на 3 мм до того момента, пока общая величина осадки не достигла 18 мм.

В испытаниях измерялись значения нагрузки на ленточный фундамент, горизонтальное смещение стены и формы клина разрушения. Результаты сравнивались и оценивались в зависимости от типа анкера (винтовой или плитный), количества лопастей в спиральных анкерах, формы и размеров пластин в плитных анкерах, а также изменения расположения анкеров в грунтах.

Особое внимание обратим на оценку влияния расположения анкеров в грунтах на полученные результаты. На рис. 6 представлены гистограммы, отражающие зависимость максимальной воспринятой нагрузки и максимальных деформаций подпорной стены от конфигурации анкеров в грунтах.

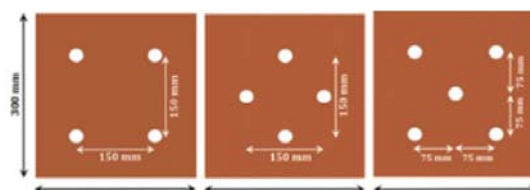
Значения максимальной воспринимаемой нагрузки фундамента изменяются в зависимости от расположения анкеров в грунтах. Конвертная группа расположения имеет большую несущую способность для всех типов анкеров в связи с добавлением пятого анкера. Несущая способность квадратной конфигурации оказалась более эффективной, чем ромбовидной конфигурации.



1)



2)



3) а) квадратная б) ромбовидная в) конвертная

Рис. 4. 1 – испытательный ящик; 2 – фото в лабораторных условиях; 3 – схема форм анкерных групп: а – квадратная; б – ромбовидная; в – конвертная
Fig. 4. 1 – test box; 2 – photo in laboratory conditions; 3 – scheme of anchor group shapes: а – square; б – diamond-shaped; в – envelope-shaped

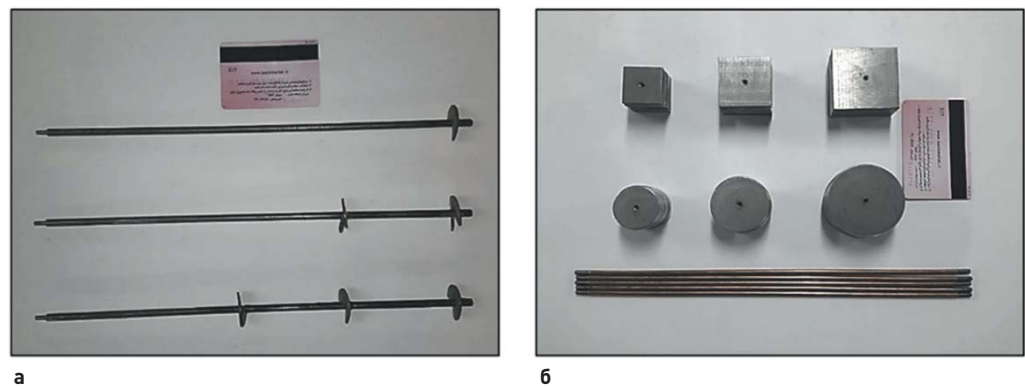


Рис. 5. Анкеры, используемые в эксперименте: а – три типа винтовых анкеров; б – шесть типов плитных анкеров
Fig. 5. Anchors used in the experiment: а – three types of screw anchors; б – six types of plate anchors

Таблица 1

Описание анкеров

Table 1

Anchor description

Обозначение	Тип анкера	Диаметр / ширина плиты, мм	Площадь плиты, мм ²	Длина анкера, мм	Длина заделки, обеспечивающей несущую способность, мм	Параметр влияния несущей способности, мм ³	Диаметр стержня, мм	Расстояние между лопастями, мм	Группа
1Н	Однолопастной винтовой	30	706,5	375	375	265	4	90	1
2Н	Двухлопастной винтовой	30	706,5	375	285–375	466	4	90	2
3Н	Трехлопастной винтовой	30	706,5	375	195–285–375	604	4	90	3
Ss	Плитный маленький квадратный	30	900	300	300	270	4	–	1
Sm	Плитный средний квадратный	40	1600	300	300	480	4	–	2
Sb	Плитный большой квадратный	50	2500	300	300	750	4	–	3
Cs	Плитный маленький круглый	33,8	900	300	300	270	4	–	1
Cm	Плитный средний круглый	45	1600	300	300	480	4	–	2
Cb	Плитный большой круглый	56,4	2500	300	300	480	4	–	3

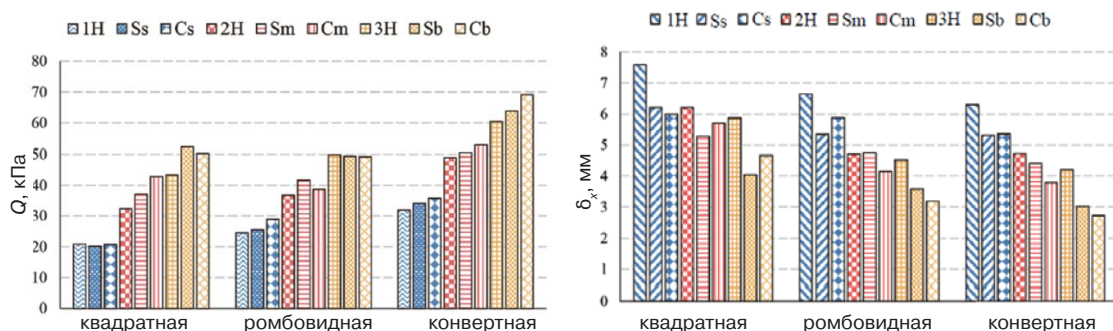


Рис. 6. Гистограммы зависимости максимальной воспринятой нагрузки и максимальных деформаций подпорной стены от расположения анкеров в грунтах [4]

Fig. 6. Dependencies of the maximum absorbed load and maximum deformations of the retaining wall on the location of anchors in soils [4]

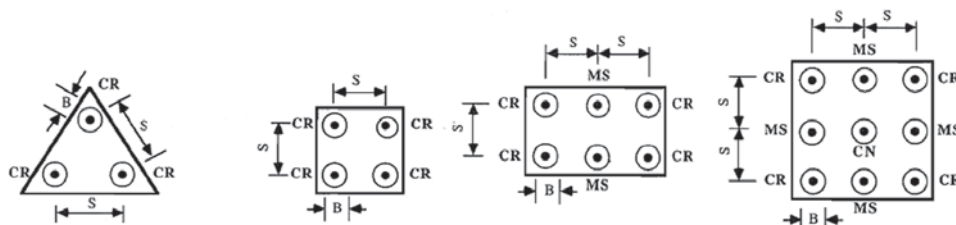


Рис. 7. Конфигурация испытанных групп анкеров [5]

Fig. 7. Configuration of tested anchor groups [5]

Изменение расположения анкеров в грунтах оказало значительное влияние на смещение стены, даже большее, чем увеличение количества анкеров. Ромбовидное расположение всех типов анкеров в грунтах показало лучшую эффективность в предотвращении смещения стены по сравнению с расположением по квадрату.

В работе [5] представлены результаты испытания на выдергивание групп винтовых анкеров в разной конфигурации (рис. 7) в песках разной плотности.

Результатами исследований установлено, что при заданном смещении вверх группа с малым количеством анкеров имеет более высокую устойчивость к подъему, чем группа с большим количеством анкеров. Описанное выше поведение было типичным для всех испытанных расстояний между анкерами и их диаметров ($S/B = 3, 4$ и 5) и для всех испытанных состояний плотности песка (плотного, средней плотности и рыхлого).

Поведение группы винтовых анкеров при подъеме зависит от следующих факторов: диаметр анкеров, глубина установки, расстояние между анкерами, свойства песка, методы их установки и конфигурация группы. Порядок установки анкеров оказывает незначительное влияние на общую выдергивающую нагрузку группы при разрушении, однако влияет на смещение отдельных анкеров при малых величинах нагрузки.

Распределение нагрузки между отдельными анкерами в группе зависит от их расположения и приложенной нагрузки.

Сопротивление группы винтовых анкеров в песчаных массивах изменяется в зависимости от характеристик плотности песка. Например, для средних и рыхлых песков сопротивление группы возрастает при увеличении расстояния между анкерами, но уменьшается

при увеличении размера группы. Влияние расстояния между анкерами в плотных песках на небольшой глубине оказывается минимальным. Однако при глубоком их расположении сопротивление возрастает, но затем уменьшается с ростом расстояния между анкерами.

Существующие исследования по теме влияния конфигурации групп анкеров в основном основаны на изучении поведения винтовых анкеров. Эти исследования, несомненно, имеют большое значение, однако они не затрагивают вопрос использования нагелей. А имеющиеся исследования с использованием нагелей ограничиваются лишь модельными испытаниями и не рассматривают вопрос влияния расположения нагелей в группе на устойчивость откосов.

Необходимость более глубокого исследования влияния расположения нагелей в группе на устойчивость откоса остается актуальной. Это обстоятельство подчеркивает важность проведения в дальнейшем комплексных исследований по этой теме.

Установочный расчет в PLAXIS 3D

Расчетная оценка влияния конфигурации нагелей на устойчивость откосов выполнена в программном комплексе PLAXIS 3D.

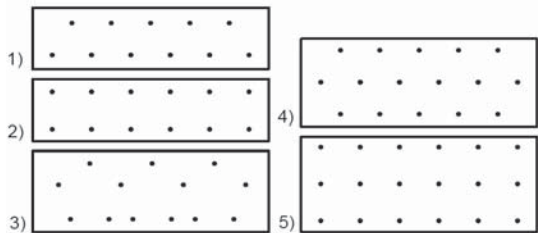
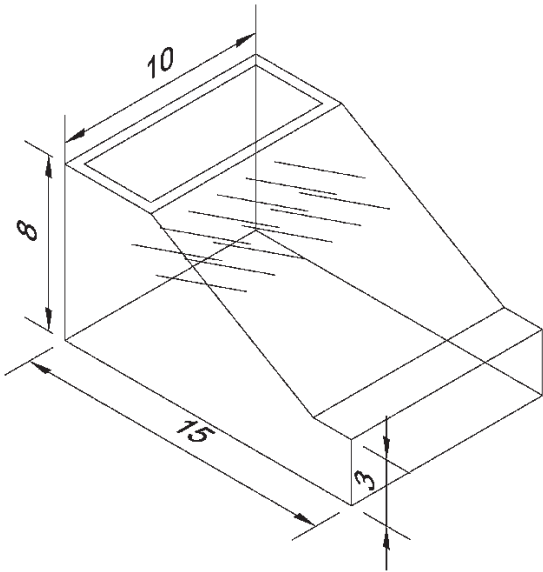


Рис. 8. Расчетная модель и различные варианты конфигураций нагелей

Fig. 8. Calculation model and different dowel configurations

Для расчета была построена 3D-модель откоса. Параметры модели представлены на рис. 8.

При расчете сравнивались следующие типы конфигураций нагелей в группе:

- треугольная с 2 и 3 рядами нагелей, расстояние между нагелями 1,5 м;
- квадратная с 2 и 3 рядами нагелей, расстояние между нагелями 1,5 м;
- многоугольная.

В качестве материала грунта был выбран песок со следующими характеристиками $\gamma = 1,7 \text{ г/см}^3$; $C = 0,001 \text{ МПа}$; $\phi = 29^\circ$.

Расчет включал в себя три этапа:

- расчет устойчивости откоса в природном состоянии;
- расчет устойчивости откоса с нагрузкой на верхней бровке 20 кН/м^2 ;
- расчет устойчивости откоса с нагрузкой на верхней бровке 20 кН/м^2 с армированием нагелями.

На рис. 9 представлены результаты расчетов в виде моделей с изолиниями. Полученные в результате расчета коэффициенты устойчивости отражены в табл. 2.

Результаты расчета свидетельствуют, что устойчивость откоса зависит от конфигурации и количества нагелей в группе. Увеличение количества нагелей сопровождается

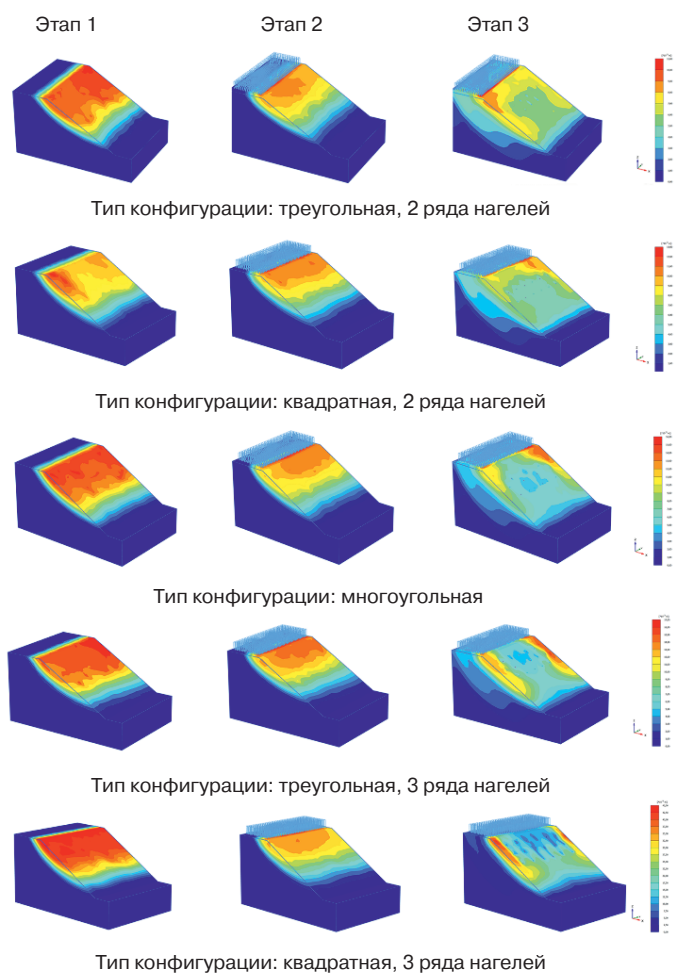


Рис. 9. Результаты расчетов откосов с различной конфигурацией нагелей
Fig. 9. Calculation results for slopes with different dowel configurations

Таблица 2

Результаты расчета

Table 2

Calculation results

Тип конфигурации	Кол-во нагелей	Коэффициент устойчивости откоса, K_{sf}		
		Природное сложение	Под нагрузкой 20 кН/м ²	Под нагрузкой 20 кН/м ² с нагелями
Треугольная, 2 ряда нагелей	11	1,291	1,227	1,364
Квадратная, 2 ряда нагелей	12	1,296	1,231	1,378
Многоугольная	13	1,297	1,232	1,387
Треугольная, 3 ряда нагелей	16	1,286	1,255	1,388
Квадратная, 3 ряда нагелей	17	1,285	1,223	1,449

повышением коэффициента устойчивости. Разница между коэффициентами устойчивости для многоугольной и треугольной трехрядной конфигурацией составила всего 0,072 %. Многоугольная конфигурация при этом требует на три единицы нагелей меньше. Это позволяет предположить, что выбор многоугольной конфигурации будет экономичнее.

Заключение

В данной статье подтверждается актуальность и важность изучения влияния конфигурации групп нагелей на устойчивость откосов, подчеркивается необходимость проведения более глубоких и комплексных исследований в этой области.

Список литературы

1. United States Federal Highway Administration. Recommendations clouterre 1991. Soil nailing recommendations –1991 for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing. Report No. FHWA-SA-93-026. U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Presses de L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussees; 1993.
2. СТО НОСТРОЙ 2.5.126-2013. Освоение подземного пространства. Устройство грунтовых анкеров, нагелей и микросвай. Правила и контроль выполнения, требования к результатам работ. Москва; 2016.
3. Singh S., Shrivastava A.K. Effect of soil nailing on stability of slopes. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). 2017;5(X):752–763. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2017.10109>
4. Mahmoudi-Mehrzi M.E., Jalali-Moghadam M. Comparing the performance of helical anchors and direct-embedded plate anchors in cohesionless soil for top-down retaining walls stabilization: an experimental study. Journal of GeoEngineering. 2020;15(1):31–45. [https://doi.org/10.6310/jog.202003_15\(1\).3](https://doi.org/10.6310/jog.202003_15(1).3)
5. Ghaly A., Hanna A. Model investigation of the performance of single anchors and groups of anchors. Canadian Geotechnical Journal. 1994;31(2):273–284. <https://doi.org/10.1139/t94-032>
6. Маций С.И., Рябухин А.К. Свайно-анкерные противооползневые конструкции. Краснодар: КубГАУ; 2017.
7. Guide to Reinforced Fill Structure and Slope Design [internet]. Geotechnical Engineering Office Civil Engineering and Development Department The Government of the Hong Kong Special Administrative Region; 2002. Available at: https://www.cedd.gov.hk/filemanager/eng/content_115/eg6_2022.10.27.pdf

References

1. United States Federal Highway Administration. Recommendations clouterre 1991. Soil nailing recommendations –1991 for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing. Report No. FHWA-SA-93-026. U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Presses de L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussees; 1993.
2. STO NOSTROI 2.5.126-2013. Underground space developing. Structure of ground anchorage, dowel pins and micropiles. Regulations, control of performance and requirements to the work results. Moscow; 2016. (In Russian).
3. Singh S., Shrivastava A.K. Effect of soil nailing on stability of slopes. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). 2017;5(X):752–763. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2017.10109>
4. Mahmoudi-Mehrzi M.E., Jalali-Moghadam M. Comparing the performance of helical anchors and direct-embedded plate anchors in cohesionless soil for top-down retaining walls stabilization: an experimental study. Journal of GeoEngineering. 2020;15(1):31–45. [https://doi.org/10.6310/jog.202003_15\(1\).3](https://doi.org/10.6310/jog.202003_15(1).3)
5. Ghaly A., Hanna A. Model investigation of the performance of single anchors and groups of anchors. Canadian Geotechnical Journal. 1994;31(2):273–284. <https://doi.org/10.1139/t94-032>

6. *Matsii S.I., Ryabukhin A.K.* Pile-anchor anti-landslide structures. Krasnodar: KubGAU; 2017. [In Russian].
7. Guide to Reinforced Fill Structure and Slope Design [internet]. Geotechnical Engineering Office Civil Engineering and Development Department The Government of the Hong Kong Special Administrative Region; 2002. Available at: https://www.cedd.gov.hk/filemanager/eng/content_115/eg6_2022.10.27.pdf

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. Герсеева 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 Processes 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

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 Processes 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: chernyatin94@mail.ru

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

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. Герсеева АО «НИЦ «Строительство», Москва

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 Processes 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

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. Герсеева 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 Processes 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

[✉]Автор, ответственный за переписку / Corresponding author