



CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS

Т. 11, № 4, 2020

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.04

УДК 692.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРА РАБОТЫ СВАИ С ПОВОРОТНЫМИ АНКЕРАМИ ПРИ РАБОТЕ В МАССИВЕ ПУЧИНИСТЫХ ГРУНТОВ

О.В. Костина, Т.М. Бочкарева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 09 сентября 2020
Принята: 09 ноября 2020
Опубликована: 30 декабря 2020

Ключевые слова:

фундамент, трубопровод, свая, анкер, поворотный анкер, анкерная свая, разуплотнение основания, пучение грунтов, осадка, несущая способность.

АННОТАЦИЯ

Предлагается новая конструкция горизонтальных поворотных анкеров свай, используемых в качестве опор магистральных трубопроводов на пучинистых и обводненных основаниях. Цель применения конструкции – снижение деформативности данного вида фундамента и увеличение его несущей способности под действием влияния сил морозного пучения грунта. Произведены штамповые испытания моделей свай с поворотными анкерами на стенде для испытаний моделей фундаментов компании НПП «Геотек». По результатам испытаний произведено сравнение эффективности применения свай с расположением их поворотных анкеров в одном и в двух уровнях по стволу, а также определено снижение несущей способности свай при неблагоприятном расположении анкеров. Показано, что по результатам штамповых испытаний поворотные анкера свай положительно влияют на работу фундамента. Применение поворотных анкеров в одном уровне увеличивает несущую способность свай на 16 % и уменьшает осадку на 40 % в сравнении со свай тех же размеров, но без анкеров. Применение анкеров в двух уровнях увеличивает несущую способность свай на 73 % и уменьшает осадку на 48 %. Преимущество свай с двумя уровнями анкеров по сравнению со свай с одним уровнем анкеров составляет по несущей способности 48 %, по осадке – 11 %. Применение поворотных анкеров свай способно значительно увеличить надежность работы фундаментов магистральных трубопроводов на пучинистых и обводненных основаниях. Данное конструктивное решение превосходит по эффективности работы аналогичные металлические сваи с вертикальными анкерами при равных уровнях затрат.

© ПНИПУ

© Костина Ольга Вадимовна – магистрант, ORCID: 0000-0003-0762-0782, e-mail: up.ovg@yandex.ru.

Бочкарева Татьяна Михайловна – кандидат технических наук, доцент, ORCID: 0000-0002-4686-0407, e-mail: btm-tsp.ru@mail.ru.

Olga V. Kostina – Master Student, ORCID: 0000-0003-0762-0782, e-mail: up.ovg@yandex.ru.

Tat'yana M. Bochkareva – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, ORCID: 0000-0002-4686-0407, e-mail: btm-tsp.ru@mail.ru.

STUDY OF THE NATURE OF THE WORK OF PILES WITH ROTARY ANCHORS WHEN WORKING IN AN ARRAY OF HEAVING SOILS

O.V. Kostina, T.M. Bochkareva

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 09 September 2020
Accepted: 09 November 2020
Published: 30 December 2020

Keywords:

foundation, tubing, pile, anchor, swivel anchor, anchor pile, the decompression of the ground, the heaving of soils, settlement, bearing capacity.

ABSTRACT

A new design of horizontal pivoting pile anchors used as supports for main pipelines on heaving and watered bases is proposed. The purpose of the design is to reduce the deformability of this type of Foundation and increase its load-bearing capacity under the influence of the forces of frost heaving of the soil. Stamp tests of models of piles with rotary anchors were performed on the stand for testing Foundation models of NPP GEOTECH. Based on the test results, the effectiveness of using piles with the location of their rotary anchors at one and two levels along the trunk was compared, and the reduction in the load-bearing capacity of the pile with an unfavorable location of the anchors was determined. It is shown that according to the results of stamp tests, the rotary anchors of piles positively affect the operation of the Foundation. The use of rotary anchors in one level increases the load-bearing capacity of the pile by 16 % and reduces shrinkage by 40 % compared to a pile of the same size, but without anchors. The use of anchors in two levels increases the load-bearing capacity of the pile by 73 % and reduces the draft by 48 %. The advantage of a pile with two levels of anchors compared to its own with one level of anchors is 48 % in terms of load-bearing capacity and 11 % in terms of draft. The use of rotary pile anchors can significantly increase the reliability of the foundations of main pipelines on heaving and watered bases. This design solution is more efficient than similar metal piles with vertical anchors at equal cost levels.

© PNRPU

Введение

На современном этапе развития промышленности активно развивается отрасль добычи и переработки нефти и газа. Такое производство предполагает не только цеха добычи и заводы по переработке сырья, но и протяженные сети трубопроводов. Строительство магистральных сетей транспортировки сырья требует больших материальных затрат и должно обеспечивать безаварийную эксплуатацию трубопроводов в течение всего срока службы сооружения.

На территории Российской Федерации широко распространены пучинистые грунты. Основной проблемой данных оснований является их набухание при промерзании, вызванное силами морозного пучения грунта. При замерзании таких пород наиболее важным фактором является миграция воды, а не наличие воды в принципе, так как именно перемещение вод определяет максимальное увеличение объема грунта [1]. Также на величину морозного пучения влияют: влажность грунта перед замораживанием [2], скорость снижения температуры грунта [3], плотность, пористость и дисперсность грунта [4–6] и давление покрывающих пород [7]. Здания и сооружения, расположенные на таких основаниях, могут быть подвержены вертикальным перемещениям в течение всего срока эксплуатации строительного объекта, за счет смерзания конструкций фундаментов с грунтом. Исследования показывают, что повторное замораживание приводит к значительному увеличению напряжений на границе контакта грунт – опора [8]. Вертикальные перемещения сами по себе не представляют большой опасности, главной проблемой является именно неравномерность этих перемещений в отдельных точках конструкций, вследствие чего появляются крены зданий, раскрываются трещины, нарушается целостность коммуникаций.

Относительно трубопроводов морозное пучение грунтов проявляется в поднятии отдельных опор магистралей, в связи с чем изгибаются трубы. Это может грозить авариями, вплоть до разрыва труб и разлива углеводородов [9].

Для недопущения аварийных ситуаций применяются различные методы, нивелирующие негативное влияние сил морозного пучения грунта. Одним из наиболее эффективных методов является устройство анкерных свайных фундаментов [10–13]. Такие конструкции предполагают уширения различной конфигурации. Согласно современным исследованиям, за счет шероховатой поверхности, наличия выступающих элементов и увеличения поверхности контакта свая – грунт, анкерные сваи имеют большое сопротивление поднятию [14, 15].

Одной из известных систем, применяемых для уменьшения пучения грунта, являются свайно-анкерные группы. Однако их устройство подразумевает большой расход металла и высокую трудоемкость производства [16]. Отдельно можно выделить двуконусные сваи, в которых уширение поперечного сечения работает как анкер [17]. Такая конструкция предполагает разуплотнение грунта в зоне верхнего конуса, что отрицательно сказывается на сопротивлении поднятию сваи. Вертикальные анкеры для свай различного назначения показывают свою эффективность при работе на выдергивающие нагрузки [18], однако их несущую способность можно увеличить, применяя горизонтальные анкеры. Такими анкерами могут служить прямоугольные пластины [19]. Главной проблемой их применения является сложность погружения на заданную глубину, поэтому оптимальной конструкцией анкеров свай являются поворотные анкеры, которые принимают рабочее положение непосредственно на проектной отметке.

В работе [20] предложена новая конструкция поворотного анкера, применяемая для стальных свай оболочек с коническим наконечником. Анкер выполнен из металла, имеет п-образную форму в плане, оснащен треугольными лопастями для сцепления с грунтом (рис. 1). В стенке анкера имеется вытянутое отверстие для хода болта, соединяющего его со свайей.

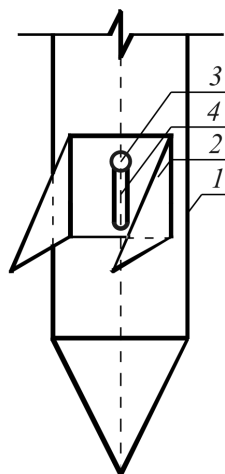


Рис. 1. Конструкция сваи с поворотным анкером:
1 – свая; 2 – поворотный анкер; 3 – болт; 4 – отверстие для хода болта

Fig. 1. Construction of a pile with a rotary anchor:
1 – pile; 2 – swivel anchor; 3 – bolt; 4 – hole for the bolt stroke

Свая предлагаемой конструкции имеет три анкера, расположенных на одной высоте и равноудаленных друг от друга. Свая погружается при вертикальном положении анкеров, при этом они переходят в крайнее верхнее положение относительно соединительного бол-

та, треугольные лопасти прорезают грунт и не препятствуют процессу. Не доходя сваей до проектной отметки на 0,5 м, осуществляют поворот сваи вокруг своей оси, в результате чего анкер отклоняется от вертикали и переходит в горизонтальное положение, треугольные лопасти фиксируются в грунте. Затем свая догружается, образуя уплотненную зону грунта под лопастями. В результате увеличивается несущая способность сваи на вдавливание и поднятие.

Основная часть

Оценить несущую способность сваи и осадку можно методами физических испытаний моделей свай. С этой целью использован стенд для испытаний моделей фундаментом компании НПП «Геотек» с размерами лотка 1×1×0,2 м. Данное оборудование имеет масштаб проектирования 1:30. На стенде произведены штамповые испытания моделей свай предлагаемых конструкций. Нагружение происходит через стальной штамп размерами в плане 156×50 мм. Нагрузка на модель передается ступенями по 25 кПа до достижения значения в 500 кПа либо до максимального перемещения штампа на 21 мм. Каждая ступень нагрузки выдерживается в течение 30 минут для стабилизации деформаций грунта.

Для экспериментального исследования принята свая – оболочка по ГОСТ Р 57991–2017 длиной 6000 мм диаметром 630 мм, соответствующая ей модель имеет длину 200 мм и диаметр 21 мм. На практике свай-оболочки после установки в проектное положение заполняются бетонной смесью. В связи с малым масштабом моделирования было принято решение, что модель будет выполнена из сплошного металлического стержня (рис. 2). Конструкция анкера для трубы диаметром 630 мм имеет длину и ширину 450 мм, величина выступа нижних граней лопастей составляет 300 мм. С учетом масштаба моделирования принято допущение, что анкер будет представлен в виде прямоугольного треугольника с размерами катетов 10 и 15 мм (рис. 3).



Рис. 2. Модель сваи без анкеров: *a* – длина модели; *б* – размер поперечного сечения модели
Fig. 2. Model of a pile without anchors: *a* – the length of the model;
b – the size of the cross-section of the model



Рис. 3. Модель сваи с анкерами в рабочем положении: *a* – вид сбоку; *б* – размещение анкеров
Fig. 3. Model of a pile with anchors in the working position: *a* – side view; *b* – anchor placement

В рамках исследования проведены штамповые испытания свай как с одним, так и с двумя уровнями расположения поворотных анкеров по высоте ствола свай. Анкеры второго уровня расположены со смещением в плане относительно анкеров нижнего яруса, при этом верхний уровень анкеров должен быть расположен ниже глубины сезонного промерзания грунта (рис. 4).

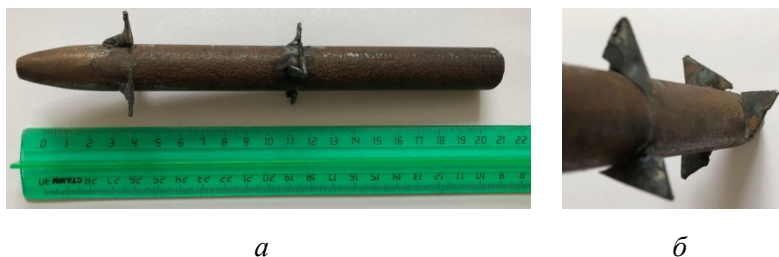


Рис. 4. Модель свай с двумя уровнями анкеров: *a* – вид сбоку; *б* – размещение анкеров
Fig. 4. Model of a pile with two levels of anchors: *a* – side view; *b* – anchor placement

Для полной оценки эффективности применения поворотных анкеров свай необходимо определить процент снижения несущей способности и увеличения осадки при неблагоприятном положении анкеров, т.е. при их неполном раскрытии по сравнению с горизонтальным положением анкеров, соответственно, для свай с одним и двумя уровнями расположения анкеров. Для моделирования такого состояния разработаны модели свай в анкерами под углом 45° (рис. 5, 6).

Результаты проведенных штамповых испытаний моделей анкерных свай представлены в таблице.



Рис. 5. Модель свай с анкерами, расположенными под углом 45° в одном уровне:
a – вид сбоку; *б* – размещение анкеров

Fig. 5. Model of a pile with anchors located at an angle of 45° at the same level:
a – side view; *b* – anchor placement



Рис. 6. Модель свай с анкерами, расположенными под углом 45° в двух уровнях:
a – вид сбоку; *б* – размещение анкеров

Fig. 6. Model of a pile with anchors located at an angle of 45° in two levels:
a – side view; *b* – anchor placement

Результаты штамповых испытаний

The results of die tests

Давление P , кПа	Осадка песчаного основания $S_{осч}$, мм	Осадка сваи без анкеров $S_{б.а}$, мм	Осадка сваи с горизонталь- ными анкерами $S_{1а}$, мм	Осадка сваи с анкерами под углом 45° $S_{1а.45}$, мм	Осадка сваи с двумя уров- нями горизон- тальных анке- ров $S_{2а}$, мм	Осадка сваи с двумя уров- нями анкеров под углом 45° $S_{2а.45}$, мм
0	0,00	0	0	0	0	0
25	0,56	0,24	0,05	0,07	0	0
50	1,23	0,25	0,05	0,08	0	0
75	1,92	0,19	0,05	0,10	0	0,07
100	2,58	0,50	0,05	0,35	0,03	0,12
125	3,30	0,73	0,11	0,46	0,04	0,52
150	3,81	1,88	0,22	0,67	0,06	0,89
175	4,16	2,75	0,44	0,82	0,07	1,23
200	4,61	3,38	0,80	1,02	0,08	1,74
225	5,17	3,91	1,38	1,52	0,38	2,79
250	5,57	4,45	2,03	2,45	0,96	4,57
275	5,85	4,97	2,71	3,76	1,91	5,94
300	5,94	5,55	3,33	5,59	2,88	6,86
325	20,97	17,79	4,03	8,46	3,62	7,79
350		20,07	4,91	14,37	4,40	8,82
375			19,55	20,99	5,19	9,69
400					5,99	10,77
425					6,75	14,66
450					7,48	20,89
475					8,37	
500					9,22	
520					10,71	

Для наглядного представления результатов штамповых испытаний построены графики «давление (P) – осадка (S)» (рис. 7–10). Результаты сгруппированы по следующим принципам:

- а) эффективность применения горизонтальных анкеров в одном уровне (см. рис. 7);
- б) определение увеличения несущей способности и уменьшения осадки для сваи с двумя уровнями анкеров по сравнению со свай с одним уровнем анкеров (см. рис. 8);
- в) определение снижения эффективности анкеров в одном уровне при их неблагоприятном положении по сравнению с оптимальным (горизонтальным) положением (см. рис. 9);
- г) определение снижения эффективности анкеров в двух уровнях при их неблагоприятном положении по сравнению с оптимальным (горизонтальным) положением (см. рис. 10).

Анализируя результаты эксперимента по определению эффективности применения горизонтальных анкеров в одном уровне (см. рис. 7), можно сказать, что применение поворотных анкеров дает увеличение несущей способности сваи и снижение осадки. При нагрузке в 300 кПа осадка сваи без анкеров составляет 5,55 см, при этих же условиях свая с анкерами имеет осадку 3,33 см, т.е. осадка уменьшается на 40 %. Несущая способность сравниваемых моделей свай составляет 300 и 350 кПа соответственно, т.е. данная конструкция анкеров увеличивает несущую способность на 16 %. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность предложенной конструкции анкеров именно на предотвращение вертикального перемещения сваи, что необходимо для нивелирования влияния сил морозного пучения грунта.

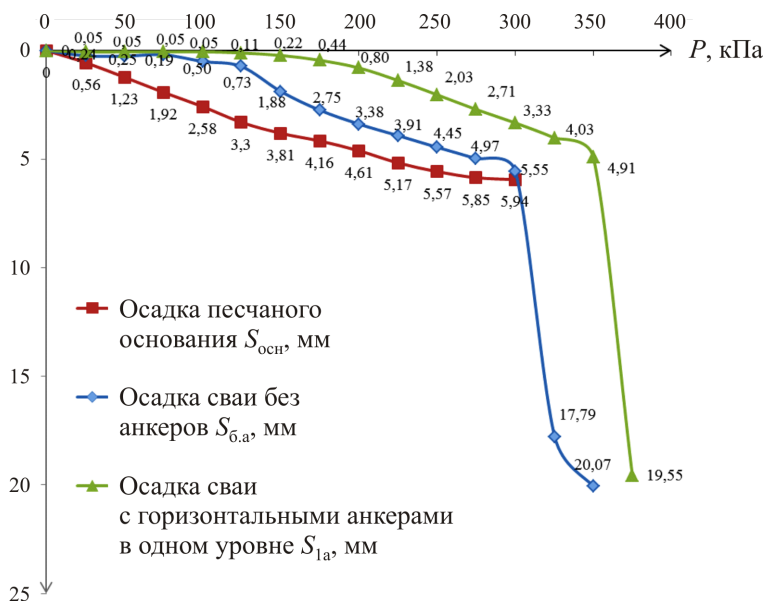


Рис. 7. График «давление (P) – осадка (S)» для сваи без анкеров и сваи с одним уровнем горизонтально расположенных анкеров. P – давление, передаваемое на штамп, кПа; S – осадка сваи, мм

Fig. 7. Graph "pressure (P) – draft (S)" for a pile without anchors and a pile with one level of horizontal anchors. P – pressure transmitted to the stamp, kPa; S – pile draft, mm

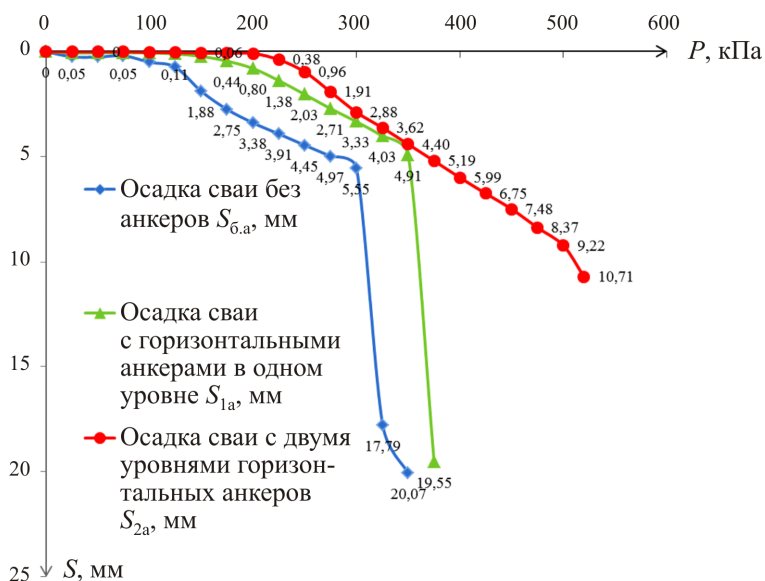


Рис. 8. График «давление (P) – осадка (S)» для свай с одним и двумя уровнями горизонтально расположенных анкеров и свай без анкеров. P – давление, передаваемое на штамп, кПа; S – осадка сваи, мм

Fig. 8. Graph "pressure (P) – draft (S)" for piles with one or two levels of horizontal anchors and piles without anchors. P – pressure transmitted to the stamp, kPa; S – pile draft, mm

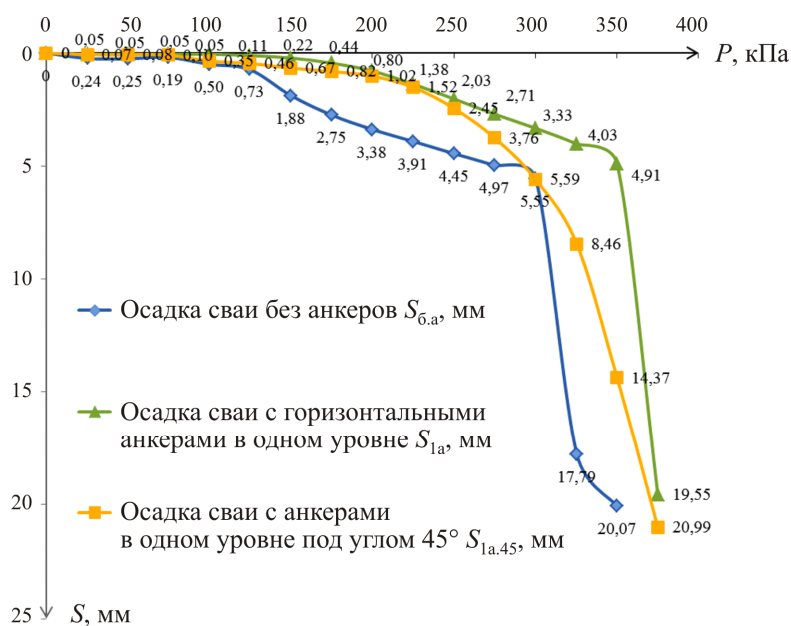


Рис. 9. График «давление (P) – осадка (S)» для свай с горизонтальными анкерами и анкерами, расположенными под углом 45° , и свай без анкеров. P – давление, передаваемое на штамп, кПа; S – осадка свай, мм

Fig. 9. Graph "pressure (P) – draft (S)" for piles with horizontal anchors and anchors located at an angle of 45° and piles without anchors. P – pressure transmitted to the stamp, kPa; S – pile draft, mm

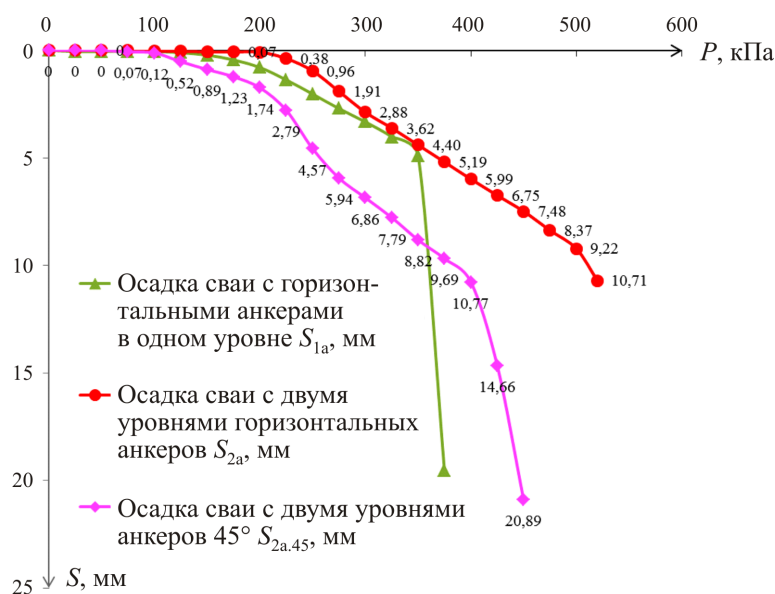


Рис. 10. График «давление (P) – осадка (S)» для свай с двухуровневыми горизонтальными анкерами и анкерами, расположенными под углом 45° , и свай с одним уровнем горизонтальных анкеров. P – давление, передаваемое на штамп, кПа; S – осадка свай, мм

Fig. 10. Graph "pressure (P) – draft (S)" for piles with two-level horizontal anchors and anchors located at an angle of 45° , and piles with one level of horizontal anchors. P – pressure transmitted to the stamp, kPa; S – pile draft, mm

Испытания сваи с двумя уровнями поворотных анкеров в горизонтальном положении (см. рис. 8) показали высокую эффективность не только по осадке, но и по несущей способности. Как говорилось выше, нагрузка на модель передается ступенями по 25 кПа. При проведении эксперимента нагрузка на штамп достигла значения 500 кПа, еще некоторое время она увеличивалась до 520 кПа, но следующая ступень нагрузки в 525 кПа достигнута не была, в связи с техническими характеристиками стенда. Однако деформации на тот момент составляли 10,71 мм, что намного меньше предельного значения в 21 мм. После достижения максимально возможной нагрузки программное обеспечение лотка заканчивает испытания, т.е. фактическая несущая способность модели не определена. Даже при таком результате эксперимента можно отметить увеличение несущей способности по сравнению со свайей с одним уровнем анкеров на 48 %. Уменьшение осадки, соответственно, составляет 11 %. Относительно сваи без анкеров исследуемая модель показала увеличение несущей способности на 73 % и уменьшение осадки на 48 %.

На практике могут возникнуть ситуации, когда при повороте сваи анкера не достигнут горизонтального положения. Для оценки снижения несущей способности сваи были проведены штамповые испытания ее модели с анкерами, расположенными под углом 45° (см. рис. 9, 10).

При испытании сваи с одним уровнем анкеров, расположенных под углом 45° (см. рис. 9), при нагрузках до 250 кПа рассматриваемая модель имеет почти те же результаты, что и свая с горизонтальными анкерами. При увеличении нагрузки ситуация меняется. Значения несущей способности и осадки стремятся к показателям сваи без анкеров, но все же положительный эффект остается. Кривая «давление – осадка» имеет принципиально другой вид по сравнению с графиком обычной сваи или сваи с горизонтальными анкерами. Это можно объяснить тем, что анкера в таком положении стали направляющими, по которым свая погружалась в грунт все ниже. Они прорезали массив и не давали дополнительной площади опирания на грунт.

Завершающим экспериментом было испытание сваи с двумя уровнями анкеров, расположенных под углом 45° (см. рис. 10). Наблюдается снижение несущей способности на 23 % и увеличение осадки на 79 % по сравнению со свайей с двумя уровнями анкеров в их горизонтальном положении. Однако показатели исследуемой сваи значительно выше сваи с одним уровнем анкеров, расположенных горизонтально, т.е. даже при неполном раскрытии анкеров двухуровневая свая эффективнее сваи с одним уровнем анкеров.

Заключение

По итогу проведения штамповых испытаний поворотные анкера свай показали свою эффективность. Металлические лопасти, врезаясь в грунт, фиксируют сваю в определенном положении по вертикали, тем самым повышая ее сопротивление выдергивающим нагрузкам.

1. Результаты экспериментов определили, что анкера, расположенные в одном уровне по высоте сваи, увеличивают несущую способность сваи на 16 % и уменьшают осадку на 40 % в сравнении со свайей без анкеров.

2. Применение анкеров в двух уровнях увеличивает несущую способность сваи на 73 % и уменьшает осадку на 48 %. Преимущество сваи с двумя уровнями анкеров, расположенных по стволу сваи, по сравнению со свайей с одним уровнем анкеров, составляет по несущей способности 48 %, по осадке – 11 %.

3. При неполном «раскрытии» анкеров положительный эффект снижается, но контролируемые показатели остаются выше показателей свай без анкеров. Стоит отметить, что наклонные анкеры в двух уровнях работают более продуктивно в сравнении с горизонтальными анкерами в одном уровне, т.е. надежность работы конструкции возрастает при использовании свай с двумя уровнями анкеров.

По результатам штамповых испытаний следует вывод: предлагаемая конструкция анкеров способна значительно снижать негативное влияние сил морозного пучения грунта.

Библиографический список

1. Application of practical one-dimensional frost heave estimation method in two-dimensional situation / Hao Zheng, Shunji Kanie, Fujun Niu, Satoshi Akagawa, Anyuan Li // *Soils and Foundations*. – 2016. – Vol. 56, no. 5. – P. 904–914. DOI: 10.1061/j.sandf.2016.08.014
2. Сви́дерских А.В. Исследование различных типов грунта на морозное пучение при оптимальной влажности и его анализ // Педагогическое образование на Алтае. – 2014. – № 2. – С. 239–240.
3. Wang Pingsheng, Zhou Guoqing. Frost-heaving pressure in geotechnical engineering materials during freezing process // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2018. – Vol. 28, no. 2. – P. 287–296. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.06.003.
4. Казанцева П.А., Сазонова С.А., Пономарев А.Б. Лабораторное исследование влияния плотности грунта на степень морозного пучения // *Геотехника*. – 2016. – № 4. – С. 4–9.
5. Zhitao Li, Caichu Xia, Qiang Li. Experimental and numerical study on frost heave of saturated rock under uniform freezing conditions // *Journal of Geophysics and Engineering*. – 2018. – Vol. 15, no. 2. – P. 593–612. DOI: 10.1088/1742-2140/aa93ac.
6. Соколова О.В., Соколова В.С. К вопросу о природе и основных закономерностях развития морозного пучения в крупнообломочных грунтах // *Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов*. – 2017. – С. 111–114.
7. Feng Ming, Dong-Qing Li. Experimental and Theoretical Investigations on Frost Heave in Porous Media // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2015. – Vol. 2015. – P. 1–9. DOI: 10.1155/2015/198986.
8. Stress and deformation characteristics of transmission tower foundations in permafrost regions along the Qinghai–Tibet Power Transmission Line / Zhi Wen, Qihao Yu, Mingli Zhang, Ke Xue, Liangzhi Chen, Desheng Li // *Cold Regions Science and Technology*. – 2016. – Vol. 121. – P. 214–225. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.06.007.
9. Компьютерная оценка ресурса прочности магистральных нефтепроводов на участках трасс со структурно неустойчивыми грунтами при температурных перепадах / А.А. Александров [и др.] // *Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2011. – № 4 (86). – С. 40–46.
10. Марахтанов В.П. Криогенные деформации свайного основания трубопроводов // *Трубопроводный транспорт: теория и практика*. – 2013. – № 5 (39). – С. 18–22.
11. Способы борьбы с морозным пучением сезоннопромерзающих грунтов в основаниях фундаментов зданий и сооружений / Д.С. Скворцов [и др.] // *Вестник евразийской науки*. – 2019. – Т. 11, № 5. – С. 68.
12. Костина О.В., Бочкарева Т.М. Анализ и классификация методов анкерования фундаментов магистральных трубопроводов на разуплотненных грунтах // *Master's Journal*. – 2019. – № 2. – С. 119–126.

13. Елоев Т.В., Гудиева И.Н. Деформации сооружений при морозном пучении грунтов // *Инновации в науке и практике*. – 2018. – С. 93–96.
14. Yong-Sen Yang, Liu-Chao Qiu. MPM simulation of uplift resistance of enlarged base piles in sand // *Soils and Foundations*. – 2020. – Vol. 60, no. 5. – P. 1322–1330. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.08.003.
15. Saravanan R., Arumairaj P.D., Subramani, T. A study on behavior of vertical pile in sand under uplift load // *Geotechnical Engineering*. – 2018. – Vol. 49, no. 3. – P. 67–72.
16. Phanikumar B.R., Muthukumar M. Reducing heave of expansive clay beds through granular pile-anchor groups // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*. – 2014. – Vol. 167, no. 2. – P. 99–107. DOI: 10.1680/grim.12.00009.
17. Добрынин А.О. Повышение эффективности свайных фундаментов, устраиваемых в пучинистых грунтах // *Интернет-журнал «Науковедение»*. – 2015. – Т. 7, № 6 (31). – С. 143.
18. Model study of single pile with wings under uplift loads / Mohamed Sakr, Ashraf Nazir, WaseimAzzam, Ahmed Sallam // *Applied Ocean Research*. – 2020. – Vol. 100. – P. 102187. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102187.
19. Niroumand H., Kassim K.A. Square plates as symmetrical anchor plates under uplift test in loose sand // *Geomechanics and Engineering*. – 2014. – Vol. 6, no. 6. – P. 593–612. DOI: 10.12989/gae.2014.6.6.593.
20. Костина О.В., Бочкарева Т.М. Исследование эффективности работы свай с системой анкеров при устройстве фундаментов магистральных трубопроводов на пучинистых грунтах // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. – 2020. – № 2. – С. 369–374.

References

1. Hao Zheng, Shunji Kanie, Fujun Niu, Satoshi Akagawa, Anyuan Li. Application of practical one-dimensional frost heave estimation method in two-dimensional situation. *Soils and Foundations*, 2016, vol. 56, no. 5, pp. 904–914. DOI: 10.1061/j.sandf.2016.08.014
2. Sviderskih A.V. Issledovanie razlichnyh tipov grunta na moroznoe puchenie pri optimal'noj vlazhnosti i ego analiz [Study of various types of soil for frost heaving at optimal humidity and its analysis]. *Teacher education in Altai*, 2014, no. 2, pp. 239–240.
3. Wang, Pingsheng, Zhou, Guoqing. Frost-heaving pressure in geotechnical engineering materials during freezing process. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2018, vol. 28, no. 2, pp. 287–296. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.06.003.
4. Kazantseva P.A., Sazonova S.A., Ponomarev A.B. Laboratornoe issledovanie vliianiia plotnosti grunta na stepen' moroznogo pucheniia [Laboratory study of the effect of soil density on the degree of frost heaving]. *Geotechnics*, 2016, no. 4, pp. 4–9.
5. Zhitao Lv, Caichu Xia, Qiang Li. Experimental and numerical study on frost heave of saturated rock under uniform freezing conditions. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2018, vol. 15, no. 2, pp. 593–612. DOI: 10.1088/1742-2140/aa93ac.
6. Sokolova O.V., Sokolova V.S. K voprosu o prirode i osnovnyh zakonostyakh razvitiya moroznogo pucheniya v krupnooblomochnyh gruntah [On the nature and main regularities of the development of frost heaving in large-block soils]. *Kulaginsky readings: techniques and technologies of production processes*, 2017, pp. 111–114.
7. Feng Ming, Dong-qing Li. Experimental and Theoretical Investigations on Frost Heave in Porous Media. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, vol. 2015, pp. 1–9. DOI: 10.1155/2015/198986.

8. Zhi Wen, Qihao Yu, Mingli Zhang, Ke Xue, Liangzhi Chen, Desheng Li. Stress and deformation characteristics of transmission tower foundations in permafrost regions along the Qinghai–Tibet Power Transmission Line. *Cold Regions Science and Technology*, 2016, vol. 121, pp. 214–225. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.06.007.

9. Aleksandrov A.A. et al. Kompyyuternaya otsenka resursa prochnosti magistralnykh nefteprovodov na uchastkakh trass so strukturno neustoychivymi gruntami pri temperaturnykh perepadakh [Computer assessment of trunk pipeline durability in the areas of structurally unstable soils and temperature drop]. *Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products*, 2011, vol. 4 (86), pp. 40–46.

10. Marahtanov V.P. Kriogennye deformacii svajnogo osnovaniya truboprovodov [Cryogenic deformations of the pile Foundation of pipelines]. *Pipeline transport: theory and practice*, 2013, no. 5 (39), pp. 18–22.

11. Skvortsov D.S. et al. Sposoby bor'by s moroznym pucheniem sezonopromerzajushhih gruntov v osnovaniyah fundamentov zdaniy i sooruzhenij [Ways to combat frost heaving of seasonally freezing soils in the foundations of buildings and structures]. *Bulletin of Eurasian science*, 2019, vol. 11, no. 5, pp. 68.

12. Kostina O.V., Bochkareva T.M. Analiz i klassifikacija metodov ankerovaniya fundamentov magistral'nyh truboprovodov na razuplotnennyh gruntah [Analysis and classification of survey methods for foundations of main pipelines on decompressed soils]. *Master's Journal*, 2019, no. 2, pp. 119–126.

13. Eloev T.V., Gudieva I.N. Deformatsii sooruzhenii pri moroznom puchenii gruntov [Deformations of structures under frost heaving of soils]. *Innovations in science and practice*, 2018, pp. 93–96.

14. Yong-Sen Yang, Liu-Chao Qiu. MPM simulation of uplift resistance of enlarged base piles in sand. *Soils and Foundations*, 2020, vol. 60, no. 5, pp. 1322–1330. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.08.003.

15. Saravanan R., Arumairaj P.D., Subramani, T. A study on behavior of vertical pile in sand under uplift load. *Geotechnical Engineering*, 2018, vol. 49, no. 3, pp. 67–72.

16. Phanikumar B.R., Muthukumar M. Reducing heave of expansive clay beds through granular pile-anchor groups. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 2014, vol. 167, no. 2, pp. 99–107. DOI: 10.1680/grim.12.00009.

17. Dobrynin A.O. Povyshenie jeffektivnosti svajnyh fundamentov, ustraivaemyh v puchinistyh gruntah [Improving the efficiency of pile foundations arranged in heaving soils]. *The online journal of the Science*, 2015, vol. 7, no. 6 (31), pp. 143.

18. Mohamed Sakr, Ashraf Nazir, WaseimAzzam, Ahmed Sallam. Model study of single pile with wings under uplift loads. *Applied Ocean Research*, 2020, vol. 100, pp. 102187. DOI: 10.1016/j.apor.2020.102187.

19. Niroumand H., Kassim K.A. Square plates as symmetrical anchor plates under uplift test in loose sand. *Geomechanics and Engineering*, 2014, vol. 6, no. 6, pp. 593–612. DOI: 10.12989/gae.2014.6.6.593.

20. Kostina O.V., Bochkareva T.M. Issledovanie jeffektivnosti raboty svai s sistemoy ankerov pri ustrojstve fundamentov magistral'nyh truboprovodov na puchinistyh gruntah [Study of the effectiveness of piles with anchors in the construction of foundations of main pipelines on heaving soils]. *Modern technologies in construction. Theory and practice*, 2020, no. 2, pp. 369–374.