

РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ И ПРАВИЛ РАСЧЕТА МНОГОЛОПАСТНЫХ ВИНТОВЫХ СВАЙ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

THE DEVELOPMENT OF THEORETICAL PRINCIPLES AND RULES FOR CALCULATING MULTI-BLADE SCREW PILES UNDER CONDITIONS OF PERMAFROST SOILS

А. Г. АЛЕКСЕЕВ, канд. техн. наук

А. А. ЗВЕЗДОВ

Освоение районов с суровыми климатическими условиями, к которым относится криолитозона, требует совершенствования технологии строительства, позволяющего сокращать сроки производства работ и в то же время обеспечивать несущую способность конструкций. Этот постулат относится в полной мере к фундаментостроению на многолетнемерзлых грунтах (ММГ). Совершенствование методов устройства фундаментов, в частности, свайных фундаментов, позволит существенно повысить эффективность фундирования на ММГ. Одной из перспективных конструкций являются свайно-винтовые фундаменты с использованием многолопастных винтовых свай, применение которых в настоящее время невозможно из-за отсутствия достоверных исследований.

The development of areas with severe climatic conditions, which include cryolithozone, requires the improvement of construction technology, which allows reduction in construction time, and at the same time ensure the load-carrying capacity of structures. This postulate applies fully to the foundation construction on permafrost soils. Improving the methods of constructing foundations, in particular pile foundations, will significantly improve the efficiency of founding on permafrost soils. One of the promising designs is screw-pile foundations with using multi-lapped piles, using of which at present is not possible due to the lack of reliable studies.

На основании оценки полученных результатов выработаны предложения по методике проектирования анкеров из углеродных жгутов в части их расчета и конструирования.

В 2016 г. специалистами НИИОСП им. Н. М. Герсеванова — структурного подразделения АО «НИЦ «Строительство» — выполнена НИОКР по теме: «Разработка методики расчета многолопастных винтовых свай в многолетнемерзлых грунтах» [14] в рамках государственного заказа ФАУ «ФЦС».

В рамках НИОКР проведен анализ состояния исследуемого вопроса, а также нормативных и методических баз, затрагивающих научно-техническую проблему. По результатам, проведенного анализа составлена программа лабораторных исследований, включающая в себя испытания масштабированных моделей металлических многолопастных винтовых свай на мерзлом глинистом основании в криокамере. В ходе исследования рассматривалось несколько расчетных схем, одна из которых подтверждена экспериментально. На основе подтвержденной расчетной схемы разработана методика по определению несущей способности одиночной многолопастной винтовой сваи в условиях многолетнемерзлых грунтов.

В статье рассматривается актуальность работы, описывается экспериментальная часть, дается описание и характеристика испытательного оборудования. Анализируются принятые расчетные схемы, методология и полученная расчетная методика. В заключение даются рекомендации по дальнейшему использованию методики и ее совершенствованию.

In 2016 the specialists of NIIOSP named after N.M. Gersenvanov, which is structural subdivision of JSC 'Research and Development Center of Construction', performed research work (NIOKR) on the theme: 'Development of a methodology for calculating multi-blade screw piles in permafrost soils' as part of the state order compiled by Federal center of standardization (FAU «FCS»)

Within the framework of the work an analysis of the status of the question under study, as well as normative and methodological bases affecting the scientific and technical problem was done. Based on the results of the analysis, a program of laboratory studies, including tests of scaled models of metal multi-blade screw piles on a frozen clay base in a cryocamera was developed. In the course of the study several calculation schemes were considered, one of which was confirmed experimentally. Based on the confirmed design scheme a technique has been developed to determine the bearing capacity of a single multi-blade screw pile in permafrost conditions.

This article discusses the relevance of the work, describes the experimental part, and characterizes the test equipment. The adopted calculation schemes, methodology, and the calculation method are also considered. In conclusion, recommendations are given on the further use of the methodology and its improvement.

Ключевые слова:

Винтовые сваи, мерзлые грунты, многолетнемерзлые грунты, многолопастные сваи, свайно-винтовые фундаменты, свайные фундаменты

Key words:

Foundations, frozen soils, multi-blade piles, permafrost, pile foundations, screw pile foundations, screw piles

В настоящее время, интенсивное освоение регионов, богатых природными ресурсами, такими как газ и нефть, расположение которых находится в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ), предопределило применение современных технологий при строительстве нефте- и газопроводов, обслуживающих пунктов и вахтенных поселков, в том числе и при строительстве фундаментов. Одним из перспективных и высокотехнологичных типов фундаментов являются свайно-винтовые фундаменты с применением многолопастных винтовых свай.

Винтовые сваи (ВС) нашли широкое применение в настоящее время благодаря развитию технологий, позволяющих погружать (завинчивать) сваи при значительных крутящих моментах (до 400 кН·м). Кроме того, применение свайно-винтовых фундаментов в строительстве имеет ряд преимуществ, таких как исключение «мокрых процессов» при монтаже, что существенно уменьшает сроки устройства фундаментных конструкций. ВС прекрасно себя зарекомендовали при строительстве сооружений с незначительной вдавливающей нагрузкой (линейные сооружения, такие как высотные линии передач, нефте- и газопроводы). Помимо технико-экономических показателей, необходимость изучения темы подтверждается тем, что 60-65% территории России — это районы с распространением ММГ.

Основной проблемой применения многолопастных ВС является отсутствие в нормативной базе Российской Федерации единой методики расчета, которая позволит широко применять такие сваи при строительстве фундаментов ответственных сооружений в районах распространения ММГ.

На территории Российской Федерации основным действующим документом в области фундаментостроения является СП 24.13330.2011 Свайные фундаменты [1]. Этот Свод правил рассматривает для мерзлых грунтов возможность расчета ВС только с одной рабочей лопастью. Приведенная методика применима для расчетов несущей способности ВС с длиной тела сваи (трубы, вала, ствола) до 10 м, с одной расположенной у ее острия лопастью диаметром D до 1,2 м, заглубленной в грунт не менее чем на $5D$ м при глинистых грунтах и $6D$ — при песках. Все остальные типы свай под эту методику не подпадают.

Следует отметить, что в измененной редакции №1 СП 25.13330.2012 [2] даются требования к устройству ВС. При этом методика и правила проектирования ВС полностью в данном нормативном документе отсутствуют.

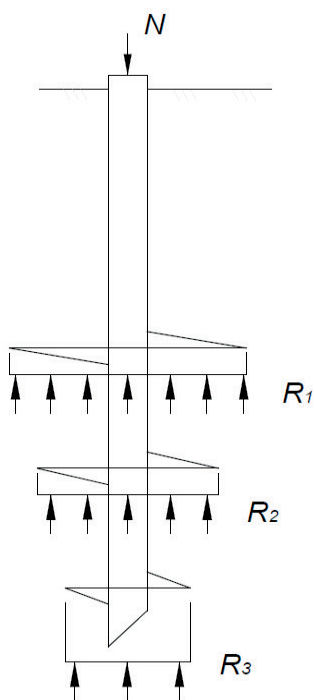
Анализируя применение ВС в строительстве, следует сделать вывод о недостаточной нормативной базе в РФ. Изложенные обстоятельства существенно усложняют реализацию проектов и их экспертизу, а именно применение в строительстве новых типов конструкций подразумевает натурные испытания, без которых получение положительного заключения экспертизы проекта невозможно. Также серьезным противоречием является тот факт, что для ВС, не вписывающихся по своим параметрам в область применения расчетной методики [3], нормы [1] требуют проведение натурных испытаний ВС статической нагрузкой. Между тем в действующем ГОСТ 5686-2012 [4] отсутствуют требования к статическим испытаниям ВС на выдергивание

(стальные ВС выведены за область применения регламентирующих испытания на выдергивание, гл.8.5 [4]).

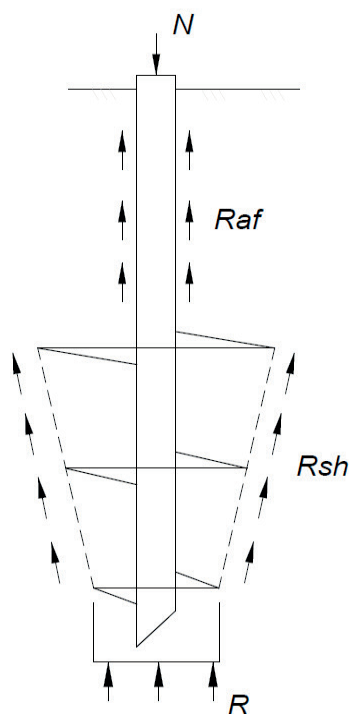
Целью представленной работы являлась разработка и получение теоретических принципов и правил расчета многолопастных свай в условиях ММГ для дальнейшего их применения при проектировании фундаментов ответственных зданий и сооружений.

В рамках работы проведен анализ нормативных и методических баз, затрагивающих научно-техническую проблему, исследованы зарубежный и российский опыт применения многолопастных ВС, а также методы их расчета.

Основной задачей, решаемой НИОКР, являлось подтверждение двух принятых принципиальных расчетных схем, в соответствии с которыми осуществляется расчет. В рамках эксперимента за основу приняты две принципиальные расчетные схемы (рис. 1 и 2).



**Рис. 1. Расчетная схема №1
многолопастной винтовой сваи**



**Рис. 2. Расчетная схема №2
многолопастной винтовой сваи**

В расчетной схеме №1 несущая способность сваи по грунту представлена как сумма сопротивлений грунта для каждой рабочей лопасти, а силы смерзания с телом сваи при этом не учитываются.

В расчетной схеме №2 винтовая часть многолопастной винтовой сваи образует уплотненное ядро грунтового основания в зоне лопастей сваи, за счет возникновения сопротивлений сдвигу грунта по границе усеченного конуса, образованного за счет разных диаметров лопастей, между нижней и верхней лопастями, тем самым увеличи-

вая полезную площадь сопротивления сдвигу по поверхности смерзания на контакте «грунт-грунт».

С целью подтверждения расчетных схем проводились на специально разработанном стенде на основе гидравлического пресса (рис. 3) лабораторные испытания масштабированных металлических моделей многолопастных ВС вдавливающей нагрузкой.

Статические испытания свай вдавливающей нагрузкой выполнялись в соответствии с ГОСТ 5686-2012 [4] с учетом дополнительных указаний. Во время испытаний не реже одного раза в сутки проводилась термометрия грунтового основания в соответствии с ГОСТ 25358-2012 Грунты. Метод полевого определения температуры [5]. Термометрия грунта основания проводилась тремя датчиками, расположенными в теле ствола сваи с шагом 20 см, согласно схеме, представленной на рис. 3.

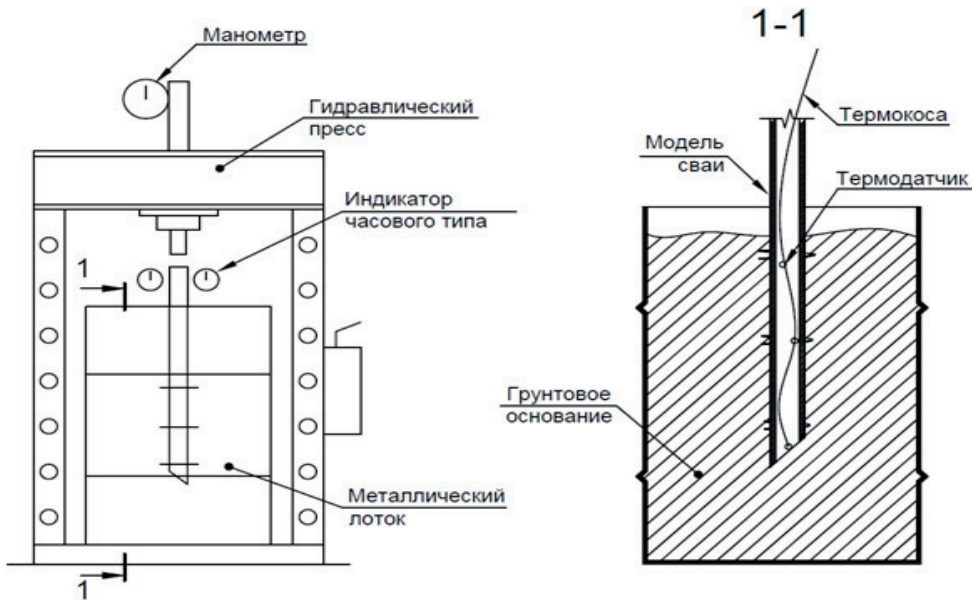


Рис. 3. Схема испытательного стенда

Для испытаний приняты две масштабированные модели многолопастных ВС диаметром 57 мм с лопастями диаметрами 100, 87 и 73 мм. Конструкция металлической модели многолопастной ВС состоит из тела сваи (металлической трубы) с приваренными к ней с одинаковым шагом лопастями, которые представляют собой винтовую часть сваи (рис. 4). Каждая из лопастей имеет разный диаметр, который уменьшается к острию сваи. Предполагается, что при завинчивании вышележащие лопасти идут по той же траектории, что и предыдущие лопасти; указанные факторы существенно упрощают процесс монтажа и позволяют существенно снизить разуплотнение грунтового массива при завинчивании многолопастной ВС.



Рис. 4. Масштабированные модели металлических многолопастных ВС

По окончании испытаний масштабированных моделей многолопастных ВС (рис. 5) определялась плотность мерзлого грунтового основания (рис. 6).

В результате определения плотности грунтового основания в винтовой части ВС установлено, что в зоне деформирования грунта за счет вертикальных перемещений лопастей под действием вертикальной вдавливающей нагрузки произошло уплотнение грунтового основания.



Рис. 5. Общий вид испытания



Рис. 6. Вскрытие грунтового основания

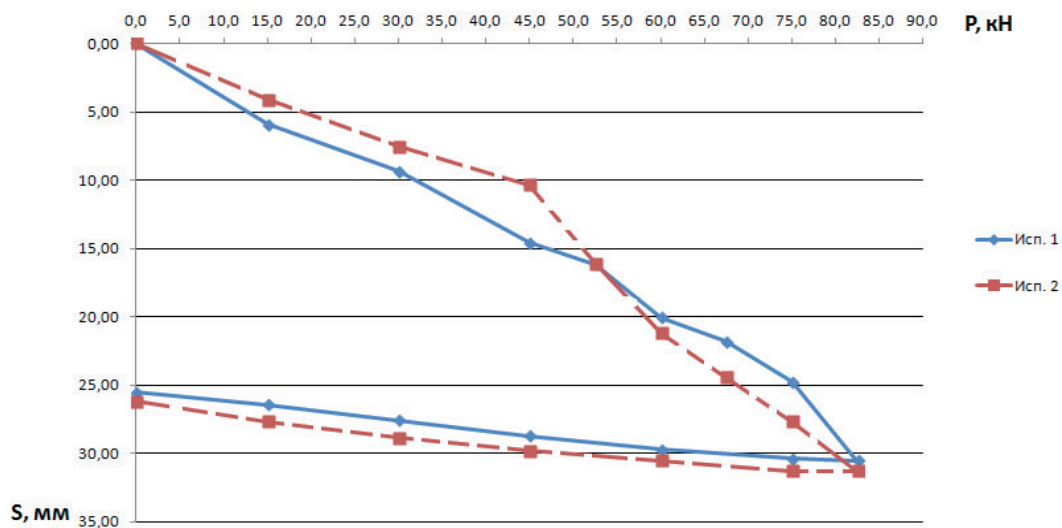
Уплотненное «ядро» образуется в зоне предельного равновесия грунта в винтовой части сваи, которая распространяется на $0,75D$ в горизонтальном направлении и $1D$ в вертикальном, где D – диаметр лопасти, и имеет цилиндрическую форму. В результате взаимодействия винтовой части с мерзлым грунтовым основанием уплотнение грунта под каждой из лопастей сваи объясняется низким значением сопротивления сдвигу по поверхности смерзания — контакт «грунт-металл». В зоне деформируемого грунта основания плотность грунта превышает исходное значение на 10%.

При испытаниях масштабированных моделей металлических многолопастных ВС было установлено, что при воздействии вертикальной вдавливающей нагрузки в винтовой части сваи образуется уплотненное ядро, а над каждой лопастью формируются цилиндрические полости под углом 90° , высота которых соответствует осадке сваи.

Такие полости над верхней лопастью свидетельствуют о том, что силы смерзания грунта с верхней лопастью и с телом сваи в вертикальной проекции от верхней лопасти до поверхности ниже сил смерзания сдвига по контакту «грунт-грунт». Поэтому свая перемещалась вниз, а массив грунта остался на своем месте без признаков деформации по телу сваи, что и привело к образованию цилиндрических полостей над каждой из лопастей.

При взаимодействии винтовой части сваи с грунтом под действием вертикальной вдавливающей нагрузки установлено, что грунт, находящийся в зоне деформирования, уплотняется за счет вертикальных перемещений лопастей. Уплотнение будет происходить до предельного значения сопротивления грунта под нижним концом сваи, после чего происходит сдвиг по контакту «грунт-грунт» в пределах винтовой части испытуемой модели сваи. Чем плотнее грунт, тем быстрее произойдет сдвиг по контакту «грунт-грунт» в винтовой части. Для рыхлых грунтов сдвиг по контакту «грунт-грунт» может не произойти.

Результаты испытаний представлены в виде графика зависимости деформаций сваи от нагрузки (рис. 7). На всех ступенях нагружения отмечена условная стабилизация деформаций. На последней ступени нагрузку увеличили на 10% от максимально приложенной и выдерживали не менее суток для получения наиболее наглядной зоны деформирования грунта. При нагрузке 82,5 кН условная стабилизация деформаций не наступила, за несущую способность модели сваи принята нагрузка на предыдущей ступени, когда наступила стабилизация, что составило 75 кН. Предельные деформации испытания 1 — 30,55 мм при нагрузке 82,5 кН; испытания 2 — 31,34 мм при нагрузке 82,5 кН;

Рис. 7. График зависимости деформаций S сваи от нагрузки P

Расчет несущей способности многолопастной ВС на действие вдавливающей нагрузки осуществляется по расчетной схеме, подтвержденной при испытаниях и представленной на рис. 8. Такая расчетная схема подразумевает, что каждая рабочая лопасть винтовой сваи самостоятельно воспринимает нагрузку, при этом в работу включается несущая способность по телу сваи за счет сил смятия по контакту «грунт-металл».

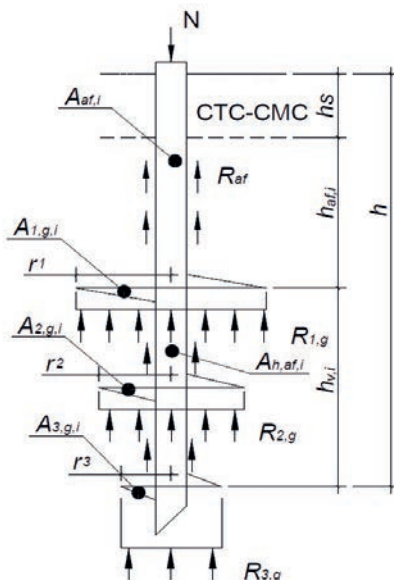


Рис. 8. Расчетная схема многолопастной ВС на действие вдавливающей нагрузки

Несущая способность грунтового основания многолопастной винтовой сваи под действием вертикальной вдавливающей нагрузки определяется по формуле

$$F_d = \gamma_c \cdot \gamma_t \cdot [A_{af,i} \cdot R_{af,i} + A_{h,af,i} \cdot R_{h,af,i} + \sum_{i,g=1}^n A_g \cdot R_{i,g}] \quad (1)$$

где F_d — несущая способность грунтового основания, при действии вдавливающей нагрузки, кН;

γ_c — коэффициент условий работы сваи, определяемый в соответствии с табл. 7.2 из [2];

γ_t — температурный коэффициент, определяемый в соответствии с указаниями приложения П из [2];

$A_{af,i}$ — площадь поверхности сдвига по материалу тела сваи, соответствующая i -му слою грунтового основания, м²;

$R_{af,i}$ — расчетное значение сопротивления сдвигу по поверхности смерзания материала сваи (контакт грунт-металл), соответствующее i -му слою грунтового основания, определяемое в соответствии с п. 7.2.3 в [2] или по таблицам приложения В из [2], кПа;

$A_{h,af,i}$ — площадь поверхности сдвига по материалу тела сваи в винтовой части, соответствующая i -му слою грунтового основания, м²;

$R_{h,af,i}$ — расчетное значение сопротивления сдвигу по поверхности смерзания материала винтовой части сваи (контакт грунт-металл), соответствующее i -му слою грунтового основания, определяемое в соответствии с п. 7.2.3 из [2] или по таблицам приложения В из [2], кПа;

$A_{g,i}$ — площадь проекции лопасти винтовой части сваи (3 шт. согласно расчетной схеме, представленной на рис. 8);

$R_{g,i}$ — расчетные сопротивления грунта под острием сваи, определяемые в соответствии с п. 7.2.3 из [2] или по таблицам приложения В из [2], (в количестве лопастей, согласно расчетной схеме, представленной на рис. 1, 2), кПа.

Площадь поверхности смерзания по материалу тела сваи определяется по формуле

$$A_{af,i} = (h_{af,i} - d_1) \cdot \pi \cdot D, \quad (2)$$

где $h_{af,i}$ — длина тела сваи, соответствующая i -му слою грунтового основания, м;

D — диаметр тела сваи (трубы), м;

d_1 — диаметр первой лопасти, м.

Площадь поверхности смерзания по материалу тела сваи в винтовой части определяется по формуле

$$A_{h,af,i} = (h_{v,i} - d_1 - d_g - 2d_{2...g-1}) \cdot \pi \cdot D, \quad (3)$$

где $h_{v,i}$ — длина тела сваи в винтовой части, соответствующая i -му слою грунтового основания, м;

$d_{2...g-1}$ — диаметр лопастей в винтовой части сваи, м;

d_g — диаметр последней лопасти, м;

d_1 — то же, что и в формуле (2);

D — то же, что и в формуле (2).

При расчете многолопастной ВС на вдавливающую нагрузку площадь проекции нижней лопасти A_g определяется по формуле

$$A_g = \pi r_g^2 - \pi \left(\frac{D}{2} - t \right)^2, \quad (4)$$

где D — то же, что и в формуле (2);

r_g — радиус нижней лопасти винтовой части сваи, м.

При расчете многолопастной ВС на вдавливающую нагрузку площадь проекции лопастей $A_{1...g-1}$ определяются по формуле

$$A_{1...g-1} = \pi r_{1...g-1}^2 - \pi \left(\frac{D}{2} \right)^2, \quad (5)$$

где D — то же, что и в формуле (2);

$r_{1...g-1}$ — радиус лопастей винтовой части сваи, м.

Заключение

Исходя из практики зарубежных стран, многолопастные ВС нашли широкое применение для устройства фундаментов в слабых грунтах и в смешанных условиях и могут эффективно применяться на территории РФ, в том числе на ММГ.

Анализ отечественной нормативной базы показал отсутствие методики расчета многолопастных ВС на ММГ, что ограничивает применение такой конструкции.

В рамках НИОКР разработана комплексная программа лабораторных исследований масштабированных моделей многолопастных ВС с определением расчетных параметров R_{sh} и R_{af} , несущей способности масштабированных моделей многолопастных ВС, а также модель взаимодействия с винтовой частью сваи и характер деформирования грунтового основания под действием вертикальной нагрузки.

Статическими испытаниями вдавливающей нагрузкой масштабированных моделей многолопастных ВС установлено, что предельная нагрузка на модель сваи составила для 1-й модели сваи 82,5 кН; для 2-й модели сваи — 82,5 кН при деформациях 30,55 мм и 31,34 соответственно. Пластические деформации составили около 85% от общих деформаций.

Исследования характера деформирования грунтового основания при испытаниях масштабированной модели многолопастной ВС показали, что у каждой отдельно работающей лопасти присутствует зона пониженного смерзания грунта с телом и лопастью сваи. У каждой лопасти установлены зоны предельного равновесия равные $0,75D$ в горизонтальном направлении и $1D$ в вертикальном, где D — диаметр лопасти. Следует отметить, что срезанное по 45° острие сваи является неэффективным решением, при завинчивании происходит нарушение исходного состояния грунтового основания. При использовании открытого острия сваи в пластично-мерзлых грунтах образуется грунтовая «пробка», что положительно отражается на несущей способности сваи, в расчете грунтовая пробка не учитывается.

В рамках исследований подтверждена и обоснована методика расчета многолопастных ВС в условиях ММГ, базирующаяся на совместной работе тела сваи по боковой поверхности и всех лопастей. Линия сдвига грунта по границе усеченного конуса, образованного лопастями разного диаметра, не подтвердилась, что объясняется конструкцией масштабированной модели ВС (размеры, шаг лопастей). Расчет по разработанной методике показал хорошую сходимость с полученными результатами испытаний, с погрешностью в пределах 10-12%.

В дальнейших исследованиях следует уделить внимание вопросу обеспечения долговечности материала свай, в том числе местам сварных соединений, и подбору антикоррозионных покрытий. А также следует оценить влияние шага и диаметра лопастей на несущую способность свай

Перспективным направлением исследований является зависимость несущей способности одиночной ВС (в том числе и многолопастной) от крутящего момента при погружении (завинчивании) свай.

Библиографический список

1. СП 24.13330.2011* (с Изм. 1) Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты.
2. СП 25.13330.2012* (с Изм. 1) Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах.
3. Трофименков Ю.Г., Мариупольский Л.Г. Винтовые сваи в качестве фундаментов мачт и башен линий передач. // Основания, фундаменты и механика грунтов. — 1964. — № 4. — С.15-19.
4. ГОСТ 5686-2012 Грунты. Методы полевого испытания сваями.
5. ГОСТ 25358-2012 Грунты. Метод полевого определения температуры.
6. СНиП II-Б.5-62. Свайные фундаменты из забивных свай. Нормы проектирования.
7. СНиП II-Б.5-67. Свайные фундаменты. Нормы проектирования.
8. Железков В.Н. Винтовые сваи в энергетической и других отраслях строительства. — СПб: «Прагма», 2004.
9. Perko H.A. Helical piles: A Practical Guide to Design and Installation. — Hoboken (New Jersey): John Wiley & Sons, 2009.
10. ASTM D 3689-90 (Reapproved 1995). Standard Test Method for Individual Piles Under Static Axial Tensile Load // Annual Book of ASTM Standard, 1997.— Vol. 04.08. — P.366-375.
11. Алексеев А.Г., Звездов А.А. Устройство винтовых свай в многолетнемерзлых грунтах /Сб. докл. Междунар. научно-практ. конф. «Современные технологии проектирования и строительства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах».— М., 2016. — С.27-31.
12. Алексеев А.Г., Звездов А.А., Шуганов И.Н., Анисимов Д.Ю. Комплексные исследования многолопастных винтовых свай в условиях многолетнемерзлых грун-

тов. / Тезисы к докладам «XI международный симпозиум по проблемам инженерного мерзлотоведения». Якутск, 2017. — С.189.

13. Алексеев А. Г., Безволев С. Г., Сазонов П. М., Звездов А. А. О необходимости исследований работы винтовых свай и актуализации норм проектирования свайно-винтовых фундаментов. // Промышленное и гражданское строительство. — 2018. — № 1. — С. 43-47.

14. НИОКР «Разработка методики расчета многолопастных винтовых свай в многолетнемерзлых грунтах». Рег. № АААА-А16-116092650006-6.

Авторы:

Андрей Григорьевич АЛЕКСЕЕВ, канд. техн. наук, заведующий лабораторией «Механики мерзлых грунтов и расчета оснований» НИИОСП им. Н. М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», доцент ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», Москва

Andrey ALEKSEEV, Ph.D. in Engineering, head of laboratory «Frozen soil mechanics and foundation analysis» NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, associate professor of Moscow State University of Civil Engineering, Moscow
e-mail: adr-alekseev@yandex.ru
тел.: +7 (926) 129-71-01

Антон Андреевич ЗВЕЗДОВ, инженер, НИИОСП им. Н. М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Anton ZVEZDOV, engineer, NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: 89636885828@mail.ru
тел.: +7 (963) 688-58-28