Источник: Кравцов, В. Н. Исследование и расчет несущей способности оснований винтовых металлических свай по величине крутящего момента, требуемого для их завинчивания / В. Н. Кравцов // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2016. – Вып. 8. – С. 114–133.

https://doi.org/10.23746/2016-8-7

Кравцов Владимир Николаевич, канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией, РУП «Институт БелНИИС», г. Минск (Беларусь)

Vladimir Kravtsov, PhD in Engineering Science, head of the laboratory, Institute BelNIIS RUE, Minsk (Belarus)

ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ОСНОВАНИЙ ВИНТОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СВАЙ ПО ВЕЛИЧИНЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА, ТРЕБУЕМОГО ДЛЯ ИХ ЗАВИНЧИВАНИЯ

RESEARCH AND CALCULATION OF THE LOAD CAPACITY OF THE BASES OF METAL SCREW PILES ACCORDING TO THE TORQUE VALUE REQUIRED FOR DRIVING THEM

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты исследований и разработанный на их основе усовершенствованный метод расчета несущей способности оснований винтовых металлических свай, нагруженных вдавливающей и выдерживающей нагрузками по величине крутящего момента, требуемого для их завинчивания. На основе анализа литературных источников [1–3 и др.] и полученных данных теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в РУП «Институт БелНИИС», показано, что между крутящим моментом $M_к$, кН·м, требуемым для завинчивания (далее – момент $M_к$) винтовой металлической сваи (далее – свая ВС) в грунт, и его несущей способностью как при вдавливании (F_d, кН), так и выдергивании (F_{dt}, кН), имеется устойчивая связь $F_d(F_{dt}) = k \cdot M_к$, где k – коэффициент перехода, 1/м.

Установлено, что величина $M_к$ и скорость завинчивания сваи ВС зависят от плотности грунта, диаметров ее ствола (d_c, м), лопасти ($D_л$, м), формы наконечника (открытый, закрытый), высоты грунтовой пробки в открытом наконечнике, влияние которой на скорость завинчивания сваи ВС и величину

$M_к$ связано с соотношением $n = D_л / d_с$. Если $n \geq 3$, величина $M_к$ определяется в основном только сопротивлением грунта завинчиванию лопасти.

При этом выявлены следующие факторы, влияющие на величину $M_к$, требуемого для завинчивания разработанной [4] и типовых [5] свай ВС, применяемых в Республике Беларусь, к которым относятся:

1. Способ завинчивания: ручной со скоростью завинчивания свай ВС в пределах от 0,5 до 2 оборотов в минуту (V, об/мин); или механический с использованием механизмов, обеспечивающих скорость вращения более 2 об/мин.

2. Диаметр и шаг лопасти. При отношении ее толщины к шагу, не превышающему $m \leq 0,6$, между $D_л$ и сопротивлением грунта завинчиванию (V, $M_к$) свай ВС практически наблюдается прямо пропорциональная зависимость.

3. Форма, материал свай ВС и соотношение этих параметров. В частности, размер и конструкция лопасти (количество витков, их шаг, расположение).

4. Тип грунта (его плотность, влажность и др.). При этом глубина погружения лопасти при механическом завинчивании свай ВС до 6 м, как правило, незначительно влияет на величину $M_к$ и скорость ее погружения за один оборот (шаг «а»).

По результатам выполненных исследований посредством натурных испытаний свай ВС длиной от 1,5 до 8 м на вдавливающие и выдергивающие нагрузки определен коэффициент перехода от $M_к$ к F_d (F_{dt}) для различных типов грунтов с замером соответствующих им значений $M_к$. Для контроля и оперативной оценки значений F_d (F_{dt}) разработан практический метод расчета сваи ВС, защемленной в грунте с диаметром лопасти $D_л \leq 800$ мм, длиной $1 \leq 8$ м, обеспечивающий повышение точности существующих методов расчета по крутящему моменту $M_к$ – не менее чем на 30 %.

ABSTRACT

The results of investigation and improved method of calculation of the load capacity of the bases of metal screw piles under pressing and holding loads from the torque value required for driving them, developed

on the basis of the performed investigation are presented. On the basis of literary sources [1–3, etc.] and the data of obtained in theoretical and experimental investigations performed in the Institute BelNIIS Republican Unitary Enterprise, it has been shown that between the torque M_k, kN·m, required for driving (hereinafter referred to as the torque M_k) of the metal screw pile (hereinafter referred to as the MS pile) into soil and its bearing capacity in case of both pressing-in (F_d, kN) and pulling out (F_{dt}, kN) exists a stable relationship F_d (F_{dt}) = $k \cdot M_k$, where k is the transition coefficient, 1/m.

It has been determined that the Mk value and MS pile driving speed depend on the soil density, diameter of the pile shaft (d_p, m), blade (D_b, m), tip shape (either open or closed) and height of soil plug in the open tip, the influence of which on the MS pile driving speed and Mk value is bound with the relationship $n = D_b/d_p$. If $n \geq 3$, the M_k value is determined mainly by the soil resistance to driving the blade.

Provided that, the following factors influencing the Mk value required for driving the developed MS piles [4] and the typical ones [5] applied in the Republic of Belarus have been revealed. They include:

1. Driving method: manual, with the MS pile driving speed of 0.5–2 revolutions per minute (V, rpm); or mechanical with the use of mechanisms providing the rotational speed of more than 2 rpm.

2. Blade diameter and pitch. Should the ratio between the blade thickness and its pitch not exceed $m \leq 0.6$, the direct proportion between the Db and the soil resistance to driving the MS piles (V, M_k) is actually observed.

3. Shape and material of MS piles and relationship between these parameters. In particular, dimensions and construction of the blade (number of threads, their pitch and arrangement).

4. Soil type (its density, dampness, etc.). In case of mechanical driving of the MS piles, the blade immersion depth of up to 6 m affects, as a rule, insignificantly the M_k value and the blade sinking rate per revolution (pitch «a»).

According to the results of the performed investigations by means of in-place tests of the MS piles with the length of 1.5–8 m for pressing-in and pulling-out loads, the coefficient of transition from M_k to F_d (F_{dt}) has been determined for various types of soils with measuring the Mk values corresponding to them. For the purpose of monitoring and

operational evaluation of the F_d (F_{dt}) values, the practical calculation method has been developed for the jammed in the soil MS pile of blade diameter $D_b \leq 800$ mm and length $1 \leq 8$ m, which has ensured the improved accuracy of the existing calculation methods based on torque M_k by at least 30 %.

Ключевые слова: винтовая металлическая свая, испытания, несущая способность, крутящий момент завинчивания, метод расчета, рекомендации.

Keywords: the screw metal pile, tests, bearing capacity, torque of screwing up, method calculation, recommendations.

ВВЕДЕНИЕ

Согласно программе капитального строительства Минстройархитектуры Республики Беларусь [6 и др.], основным направлением развития строительного производства страны в период с 2006 до 2020 года является повышение его эффективности посредством создания и внедрения новых ресурсо- и энергосберегающих материалов, конструкций и технологий. Этому в полной мере соответствуют винтовые металлические сваи (ВС), которые активно используются в последнее время в качестве фундаментов различных зданий и сооружений [3, 7 и др.].

До настоящего времени широкое их внедрение сдерживалось отсутствием нормативно-технической базы по проектированию (расчету) свай ВС в грунтовых условиях Республики Беларусь. Установлено, что отклонения фактических значений несущей способности винтовых свай в белорусском регионе от их фактических величин, рассчитанных по известным методам [8, 9 и др.] достигают 75 % и более как в сторону занижения, так и в сторону завышения [7 и др.].

В связи с этим РУП «Институт БелНИИС» выполнил ряд исследований по изучению особенностей взаимодействия свай ВС с различными типами грунта с целью совершенствования их конструкции и адаптации существующих методов расчета к грунтовым условиям Республики Беларусь.

Ниже в статье приводятся результаты одного из этапов выполненных работ по исследованию несущей способности оснований свай ВС и ее соответствия величине крутящего момента завинчивания $M_к$, установлению коэффициента перехода от $M_к$ к F_d и совершенствованию метода расчета их несущей способности по величине $M_к$.

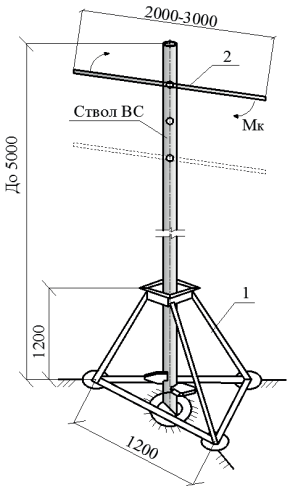
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

Одной из задач выполненных натурных исследований оснований и процесса завинчивания свай ВС являлось установление связи между несущей способностью F_d (F_{dt}) и величиной крутящего момента $M_к$ при их завинчивании в различные типы грунта.

Исследования выполнены: а – контрольным испытанием опытных коротких свай ВС длиной от 1,5 м до 3,0 м (для песков испытания выполнены С.С.Х. Аль-Тамими под руководством автора), завинченных вручную со скоростью до 2 об/мин; б – теоретически, посредством сбора и вероятностно-статистической обработки экспериментальных данных, представленных организациями ЦОИФ ООО «Стройкомплекс», ООО «Промстальконструкция» и из литературных источников [1–3, 9 и др.], завинченных механическим способом со скоростью более 2 об/мин.

Для погружения опытных коротких свай ВС в грунт применялась разработанная легкая переносная установка (рисунок 1) с использованием средств малой механизации (лебедки, ворота) и мускульная сила рабочих.

Данная установка позволяет завинчивать короткие сваи ВС длиной до 3 м с диаметром лопасти до 500 мм в глинистые грунты и длиной до 5 м в песчаные грунты средней прочности (условное сопротивление грунта погружению зонда $P_d \geq 1{,}5$ МПа). Установку несложно изготовить в механической мастерской любой строительной организации, что решает проблему широкого внедрения свай ВС без привлечения дефицитной тяжелой техники, ориентированной на завинчивание длинных типовых свай [5] с диаметром ствола, как правило, 219 мм длиной более 3 м.



1 – легкая переносная установка с воротом (2)
для завинчивания свай ВС

Рисунок 1. Принципиальная схема легкой переносной установки для завинчивания свай ВС (размеры в мм)

Переносная установка (1) для завинчивания коротких свай ВС изготовлена в форме усеченной пирамиды из металлического профиля или труб с размерами в плане нижнего основания 1,2 × 1,2 м и высотой 1,2–1,5 м. По центру верхнего основания выполнена направляющая рамка или кольцо, обеспечивающие вертикальную фиксацию ствола сваи ВС на начальном этапе ее погружения. Для установки ворота (2), создающего вращающий момент завинчивания $M_к$, в верхней части ствола с шагом 0,5 м, предусмотрены отверстия для перестановки ворота по мере погружения сваи в грунт.

Методика оценки взаимосвязи F_d (F_{dt}) с $M_к$ состояла в следующем. При завинчивании испытываемых свай ВС осуществлялся подсчет количества оборотов свай ВС на каждом метре заглубления (скорость завинчивания) и определялся крутящий момент $M_к$, кН·м, требуемые для ее погружения на различную глубину z, м, от поверхности грунта. Для этого на стволе сваи ВС через каждые 50–100 мм мелом делаются отметки, по которым подсчитывается количество оборотов, сделанных при ее погружении до заданной

отметки. Крутящий момент для опытных свай ВС, завинченных вручную, определялся с использованием динамометрического ключа, а при их завинчивании механическим способом (кабестаном), по оттарированным прибору базовой буровой установки или манометру ее гидросистемы.

Для коротких свай ВС динамометрическим ключом измерялись средние значения требуемых усилий, прилагаемых к вороту при их погружении в грунт на величину 50–100 мм, количество оборотов вокруг оси, и определялся соответствующий этому крутящий момент завинчивания.

После завинчивания свай ВС они испытывались на вдавливающую и выдергивающую нагрузки по методике СТБ 2242–2011 «Грунты. Метод полевых испытаний сваями», что позволило установить связь между несущей способностью $F_d\,(F_{dt})$ и крутящим моментом $M_к$ при их завинчивании, а также определить коэффициент перехода k_i между $F_d\,(F_{dt})$ и $M_к$, при выдергивании k_{sup}, при вдавливании k_{inf}.

Основные обработанные результаты выполненных исследований даны в таблице 1 и на рисунке 2.

Таблица 1

Нормативные коэффициенты перехода k_i от Мк к Fd (Fdt) свай ВС длиной до 10 м с $D_л$ = 300 мм (при l ≤ 3 м) и $D_л$ = 500 мм (при 3 ≤ l ≤ 10 м) в зависимости от глубины заложения лопасти в грунт l и величины крутящего момента $M_к$

Вид грунта	Коэффициент перехода k_i от $M_к$ к $F_d\,(F_{dt})$ для сваи ВС, 1/м			
	k_{sup} при выдергивании, заложении лопасти l, м, и моменте $M_к$, кН·м		k_{inf} при вдавливании, заложении лопасти l, м, и моменте $M_к$, кН·м	
	$l \le 3$, $M_к \le 50$	$3 < l \le 10$, $M_к \le 50$	$l \le 3$, $M_к \le 50$	$3 < l \le 10$, $M_к \le 50$
Песок мелкий средней прочности ($p_d \ge 2$ МПа)	3,55	7,1	4,60	9,2

Окончание таблицы 1

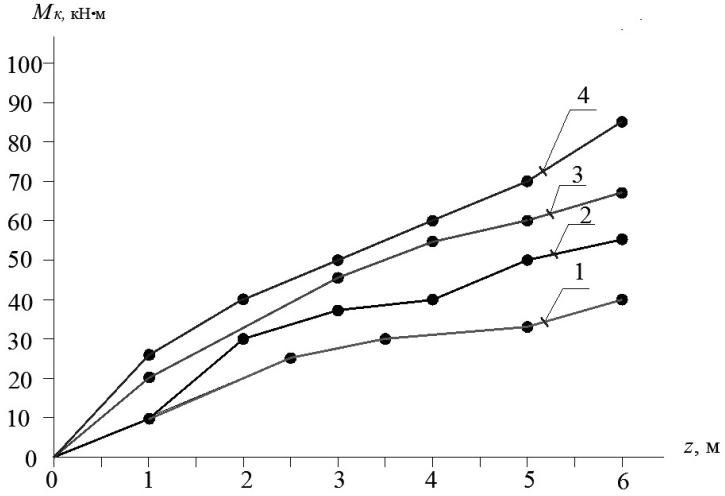
Вид грунта	**Коэффициент перехода k_i от $M_к$ к F_d (F_{dt}) для сваи ВС, 1/м**			
	k_{sup} **при выдергивании, заложении лопасти l, м, и моменте $M_к$, кН·м**		k_{inf} **при вдавливании, заложении лопасти l, м, и моменте $M_к$, кН·м**	
	$l \le 3$, $M_к \le 50$	$3 < l \le 10$, $M_к \le 50$	$l \le 3$, $M_к \le 50$	$3 < l \le 10$, $M_к \le 50$
Супесь средней прочности ($p_d \ge 1{,}5$ МПа)	5,63	11,30	7,40	14,7
суглинок средней прочности ($p_d \ge 1{,}5$ МПа)	7,30	14,60	9,54	19,14

Примечания:

1. Значение k_i для свай ВС длинной от 3 до 10 м определяются интерполяцией;
2. При отношении $D_л$ / d_c < 3 значения k_i в таблице следует умножать на коэффициент – 1,1;
3. p_d – динамическое сопротивление грунта забивке конуса зонда.

Анализ результатов завинчивания опытных свай ВС позволяет сделать выводы:

– увеличение плотности грунта (модуля деформации) снижает скорость проходки скважины, а увеличение влажности, напротив, повышает ее и снижает несущую способность грунта.
– средняя глубина погружения свай ВС за один ее оборот составляет: для песка мелкого (0,3–0,5) $D_л$, а для среднего, супесей и суглинков (0,2–0,3) $D_л$. Это соответствует оптимальному шагу между режущей и концевой частью лопасти сваи ВС, при котором не требуется дополнительного вертикального усилия.



1 – график зависимости $M_к = f(z)$ для песка мелкого средней прочности (p_d = 2–3 МПа); 2 – то же, для песка среднего (p_d = 2–3 МПа); 3 – то же, для супеси и 4 – суглинка средней прочности (p_d = 1,5–3 МПа)

Рисунок 2. Результаты исследования. График зависимости $M_к = f(z)$ величины крутящего момента $M_к$ от глубины завинчивания свай ВС z, при оптимальном отношении $n = D_л / d_с \times 3$ и $D_л \leq 500$ мм

Установлено, что величина $M_к$ и скорость завинчивания свай ВС зависят от плотности грунта, диаметров ее ствола ($d_с$, м), лопасти ($D_л$, м), формы наконечника (открытый, закрытый), высоты грунтовой пробки в открытом наконечнике, влияние которой на скорость завинчивания свай ВС и величину $M_к$ связано с соотношением $n = D_л / d_с$. Если $n \geq 3$, величина $M_к$ определяется в основном только сопротивлением грунта завинчиванию лопасти.

При этом выявлены следующие факторы, влияющие на величину *Мк*, требуемого для завинчивания разработанной [4] и типовых [5] свай ВС, применяемых в Республике Беларусь, и их несущую способность, к которым относятся:

1. Способ завинчивания: ручной со скоростью завинчивания свай ВС в пределах от 0,5 до 2 оборотов в минуту (V,

об/мин); или механический с использованием механизмов, обеспечивающих скорость вращения более 2 об/мин.

2. Диаметр и шаг лопасти. При отношении ее толщины к шагу, не превышающем $m \leq 0{,}6$, между $D_л$ и сопротивлением грунта завинчиванию (V, $M_к$) свай ВС практически наблюдается прямо пропорциональная зависимость.
3. Форма, материал свай ВС и соотношение этих параметров. В частности, размер и конструкция лопасти (количество витков, их шаг и расположение).
4. Тип грунта (его плотность, влажность и др.). При этом глубина погружения лопасти при механическом завинчивании свай ВС до 6 м, как правило, незначительно влияет на величину $M_к$ и скорость ее погружения за один оборот (шаг «а»).

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВИНТОВЫХ СВАЙ НА ВДАВЛИВАЮЩУЮ И ВЫДЕРГИВАЮЩУЮ НАГРУЗКИ ПО ВЕЛИЧИНЕ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ЗАВИНЧИВАНИЯ

Предлагаемый метод расчета несущей способности свай ВС по величине крутящего момента завинчивания базируется на обобщении результатов их испытаний последовательно вертикальной статической вдавливающей и выдергивающей нагрузками в различных грунтовых условиях (песчаных, глинистых грунтах маловлажных и влажных) при различной глубине заложения лопасти от поверхности грунта с параллельным замером момента $M_к$ по методике, указанной выше.

При разработке метода расчета использованы результаты испытаний 86-и свай ВС (собственные и из отчетных данных различных организаций) с диаметрами ствола dc = 57 мм–219 мм, лопасти $D_л$ = 150 мм–800 мм, погруженных в грунт от 1,5 м до 10 м с расположением лопасти в песчаном или глинистом грунте как на вдавливающие, так и выдергивающие статические нагрузки, в виде графиков «нагрузка-осадка» $s = f(P)$, «нагрузка-выход» $v = f(P_v)$, выполненных на территории Республики Беларусь по

методике СТБ 2242-2011, с определением крутящего момента $M_к$, требуемого для их погружения.

Анализ экспериментальных данных показал, что по мере заглубления сваи ВС момент $M_к$ и ее несущая способность возрастают, как при вдавливании, так и выдергивании, и между ними наблюдается устойчивая связь, отмеченная в [1, 3, 9 и др.], которая выражается следующей зависимостью:

$$F_d\,(F_{dt}) = k_i\,M_к, \qquad (1)$$

где $F_d\,(F_{dt})$ – несущая способность основания сваи ВС при вдавливающей и выдергивающей нагрузках, кН;

k_i – эмпирический коэффициент перехода от $M_к$ к $F_d\,(F_{dt})$, определяемый из опыта по результатам завинчивания и испытания свай ВС, 1/м, на рассматриваемой строительной площадке;

$M_к$ – величина крутящего момента, необходимая для завинчивания свай ВС на конечном этапе ее погружения, кН·м.

Для определения значений k_i и оценки факторов, влияющих на точность определения значений $F_d\,(F_{dt})$ по зависимости (1) произведена обработка графиков $P(P_v) = f(s, v)$, свыше 86 имеющихся испытаний свай ВС в различных грунтах белорусского региона, последовательно испытанных на вдавливающую (P) и выдергивающую (P_v) нагрузки с измерением осадки (s) и выхода из грунта (v), а также момента $M_к$ на конечном этапе их погружения. Для этого имеющиеся графики испытаний разбивались на группы с одинаковыми параметрами: конструкции, типа и характеристик грунта в активной зоне свай ВС, размеров лопасти и глубин ее заложения от поверхности основания. Обработка результатов испытаний для определения значений k_i (при вдавливании k_{inf}, при выдергивании k_{sup}) производилась с применением вероятностно-статистического метода, регламентированного ГОСТ 20522-2012 «Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний» с учетом основных положений теории надежности СТБ ISO 2394-2007.

Доверительная вероятность (обеспеченность) расчетных значений α принята согласно указаниям ТКП 45-5.01-254-2012. «Основания и фундаменты зданий и сооружений», α = 0,95.

Нормативные значения k_i находились делением частных величин критических нагрузок, воспринимаемых основанием отдельных свай ВС P и P_v на момент $M_к$ на конечном участке погружения, равным 50 см, соответственно при вдавливании и выдергивании, найденных по результатам натурных испытаний. Нормативные (характеристические) значения k_i приняты равными их среднеарифметическим величинам $\overline{k}_{n.\sup}$, $\overline{k}_{n.\inf}$ для каждой группы графиков с однотипными конструктивными и грунтовыми параметрами, с лопастями, погруженными на одинаковую глубину от поверхности основания.

$$k_{n.sup} = \overline{F}_{dt.m} / \overline{M}_k,\ k_{n.inf} = \overline{F}_{d.m} / \overline{M}_k,\ 1/\text{м}. \qquad (2)$$

При обработке данных исключались частные значения, для которых не выполнялись условия:

$$\left|\overline{k}_{\sup} - k_{\sup,i}\right| > vS^{k_{\sup}},\ \left|\overline{k}_{\inf} - k_{\inf.i}\right| > vS^{k_{\inf}}, \qquad (3)$$

где v – статистический критерий, принимаемый в зависимости от числа определений n, по таблице Ж.1 приложения Ж ГОСТ 20522;

Расчетные значения k_i определялись по формулам:

$$k_{\sup} = \frac{k_{n,\sup}}{\gamma_g},\ k_{\inf} = \frac{k_{n.\inf}}{\gamma_g}, \qquad (5)$$

где γ_g – коэффициент надежности, по грунту устанавливаемый по формуле:

$$\gamma_g = \frac{1}{1 \pm \rho_\alpha}, \qquad (5а)$$

здесь $\rho_\alpha = \frac{t_\alpha V}{\sqrt{n}}$ – показатель точности оценки средних значений, обозначения и расчет см. ГОСТ 20522.

Так, например, для определения $k_{n.inf}$ для свай длиной 4–5 м с лопастью диаметром 300 мм, расположенной в песке мелком, использована выборка их частных значений несущей способности F_{di} по результатам статических испытаний в количестве $n = 6$ штук со средним значением выборки генеральной совокупности $F_{dm} = 450$ кН и стандартным отклонением s = 27,4 МПа.

Применяя рекомендуемый Еврокодом 1990 статистический метод охвата для нормального распределения результатов испытаний по выражению D6 и таблице 3 приложения D, находим окончательное нормативное (характеристическое) значение F_d

$$F_d = \overline{F}_{d.m} - k_p \cdot s = 450 - 3{,}71 \cdot 27{,}4 = 348{,}35 \text{ кН}.$$

Аналогично определяем нормативное значение крутящего момента $M_к$, соответствующего F_d, которое равно $M_к = 37{,}90$ кН·м. Тогда по формуле (2) нормативный коэффициент перехода k_{inf} от $M_к$ к F_d составит для свай ВС с лопастью диаметром ($D_л = 500$ мм) погруженных в песок мелкий на глубину 4–5 м

$$k_{inf} = F_d / M_к = 248{,}35/37{,}90 = 9{,}19 \approx 9{,}20 \text{ 1/м}.$$

Итоговые результаты определения значений k_i для различных видов грунтов и свай ВС при их выдергивании и вдавливании даны в таблице 1.

Анализ известной зависимости (1) [1–3, 9 и др.] и имеющихся результатов экспериментальных данных показал, что на точность расчета несущей способности F_d (F_{dt}) по моменту $M_к$ с использованием установленного коэффициента k_i (см. таблицу 1) значительное влияние оказывают также скорость погружения свай ВС (ручной, механический способы завинчивания), тип и свойства грунта (плотность, влажность) и диаметр лопасти, которые в той или иной мере также должны учитываться в ней. Влияние указанных факторов на величину значений F_d (F_{dt}) определено на основе обработки имеющихся экспериментальных данных и учтено введением в зависимость (1) коэффициентов условий работы свай ВС

по грунту ($\gamma_{см}$) по технологии погружения в грунт ($\gamma_{см1}$). Влияние размера лопасти в (1) учитывается отношением $D_{л.i}$ / $D_{л.300}$ для коротких и $D_{л.i}$ / $D_{л.500}$ для остальных свай ВС (где $D_{л.i}$ – диаметр лопасти используемой сваи ВС, $D_{л.300}$ и $D_{л.500}$ – эталонные (эффективные) их величины, соответственно равные 300 и 500 мм, для которых получены значения k_i в таблице 1).

На основе выполненных исследований усовершенствованы метод расчета и известная зависимость (1) по [1–3, 9 и др.] оценки несущей способности оснований свай ВС (на вдавливание F_d и выдергивание F_{dt}), защемленных в грунте, длиной до 10 м с $D_л \leq 800$ мм, по крутящему моменту $M_к$ при их завинчивании от 20 до 400 кН·м на последних пятидесяти сантиметрах погружения. С учетом вышеуказанных преобразований зависимость (*i*) приняла следующий вид:

$$F_d\left(F_{dt}\right) = \gamma_{см} \cdot \gamma_{см1} \cdot k_i \cdot M_к \cdot \frac{D_{лi}}{D_л},$$

где $\gamma_{см}$ – коэффициент условий работы сваи ВС в различных типах грунта, равный $\gamma_{см} = 0{,}9$ для рыхлых ($p_d < 1{,}5$ МПа), $\gamma_{см} = 0{,}8$ для влажных ($S_r = 0{,}7$-$0{,}9$), $\gamma_{см} = 0{,}7$ для обводненных грунтов (при наличии нескольких факторов коэффициенты перемножаются);

$\gamma_{см1}$ – коэффициент, учитывающий технологию завинчивания свай ВС, равный $\gamma_{см1} = 1$ при завинчивании с крутящим моментом до $M_к \leq 50$ кН·м, $\gamma_{см1} = 0{,}75$ при завинчивании машинами с крутящим моментом более $M_к > 50$ кН·м;

k_i – эмпирический коэффициент перехода от крутящего момента завинчивания к несущей способности винтовых свай, устанавливаемый по результатам опытных работ на строительной площадке (k_{inf} – для вдавливающей, k_{sup} – для выдергивающей нагрузок), 1/м. Для сооружений III уровня ответственности и предварительных расчетов для II уровня ответственности его допускается определять по разработанной таблице 1.

$D_{лi}$ / $D_л$ – коэффициент влияния размера лопасти, где $D_{лi}$ – диаметр лопасти завинчиваемой сваи ВС, м, $D_л$ – оптимальный диаметр лопасти, равный 0,3 для коротких свай длиной до $l \leq 3$ м и $D_л = 0{,}5$ м при $l > 3$ м.

Ниже дан пример расчета по разработанному методу.

Пример. Требуется вычислить несущую способность песчаного основания типовой сваи ВС по [5] для фундаментов многоэтажного кирпичного здания с несущими стенами в точке завинчивания по величине крутящего момента $M_к$ при ее вдавливании F_d и выдергивании F_{dt}.

Дано: Геологическая колонка основания с характеристиками грунтов и графиками испытаний $s = f(P)$, $v = f(P_v)$ в точке завинчивания сваи ВС представлена на рисунке 3. Свая ВС завинчена кабестаном с заложением лопасти от поверхности планировки в песке среднем средней прочности маловлажном на глубине 8,9 м. Максимальный крутящий момент в конце завинчивания на последних 50-ти сантиметрах – $M_к$ = 45 кН·м. Геометрические характеристики сваи: диаметр ствола – 219 мм, диаметр лопасти 0,5 м, площадь – А = 0,196 м^2, периметр ствола сваи – $u_{ст}$ = 0,688 м. несущая способность сваи ВС по результатам ее испытания вдавливающей нагрузкой $F_{d.стат.}$ = 536 кН, выдергивающей $F_{dt.стат.}$ = 330 кН (см. рисунок 3).

Решение: Расчет ведем согласно разработанному методу по величине крутящего момента при завинчивании $M_к$ (см. выше).

Определяем несущую способность основания сваи ВС вдавливанию и выдергиванию сваи ВС F_d, F_{dt} в точке завинчивания по величине крутящего момента $M_к$ согласно выражению (6).

Для типовой сваи ВС, закрученной на глубину 8,9 м механическим способом при $M_к$ = 45 кН·м; с диаметром лопасти $D_л$ = 0,5 м:

$\gamma_{см}$ = 1, $\gamma_{см1}$ = 1, k_{sup} = 9,2,1/м, k_{inf} = 12,00,1/м (см. таблицу 1), получим рассчитанную по $M_к$ несущую способность основания сваи ВС, соответственно на вдавливание $F_{d.iмом.}$ и выдергивание $F_{dti.мом.}$ в точке завинчивания.

$$F_{di.мом} = \gamma_{см} \cdot \gamma_{см.i} \cdot k_{\inf} \cdot M_к \cdot \frac{D_{лi}}{D_л} = 1 \cdot 1 \cdot 12 \cdot 45 \cdot 0{,}5/0{,}5 = 540 \text{ кН},$$

$$F_{dti.мом} = \gamma_{см} \cdot \gamma_{см.i} \cdot k_{\sup} \cdot M_к \cdot \frac{D_{лi}}{D_л} = 1 \cdot 1 \cdot 9{,}2 \cdot 45 \cdot 1 \cdot 0{,}5/0{,}5 = 414 \text{ кН}.$$

Тогда согласно ТКП 45-5.01-254 и Рекомендациям [10] в рассматриваемом случае допускаемая нагрузка на сваю ВС F_u, с учетом коэффициента точности метода расчета по результатам испытаний статической нагрузкой $\gamma_k = 1{,}2$ и γ_k по моменту завинчивания, составит:

– по результатам статических испытаний:

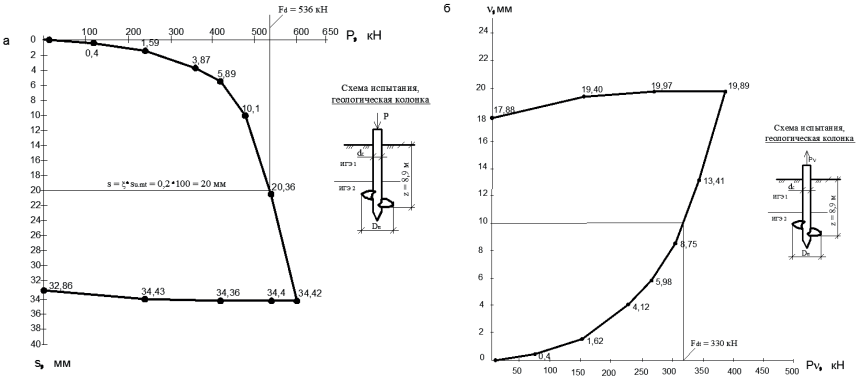
$$F_{u.стат} = \frac{536}{1{,}2} = 446{,}67 \text{ кН}, \; F_{ut.стат} = \frac{330}{1{,}2} = 275 \text{ кН},$$

– по результатам расчета по моменту $M_к$

$$F_{u.мом} = \frac{540}{1{,}3} = 415 \text{ кН} < F_{u.стат} = 446{,}67 \text{ кН}$$

(отклонение от опытных данных i = минус 8 %),

$$F_{ut.мом} = \frac{414}{1{,}3} = 318{,}46 \text{ кН} > F_{ut.стат} = 275 \text{ кН (i =плюс 15,8 %)}.$$



ИГЭ 1 – Песок мелкий средней прочности $g_{II} = 17{,}2$ кН/м^3, $C_{II} = 0{,}002$ МПа, $j_{II} = 33°$, E = 22 МПа; ИГЭ 3 – Песок средний средней прочности $g_{II} = 17{,}0$ кН/м^3, $C_{II} = 0{,}0014$ МПа, $j_{II} = 36°$, E = 35 МПа

Рисунок 3. Результаты испытаний статической вдавливающей *P* и выдергивающей P_v нагрузками сваи ВС, совмещенной с геологической колонкой (для примера расчета).
а – график зависимости *s* = *f*(*P*) осадки *s* от нагрузки *P*; б – то же, *v* = *f*(P_v) выхода из грунта *v* от нагрузки P_v

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании проведенных натурных исследований взаимодействия винтовых металлических свай с различными типами грунтов подтверждена устойчивая, практически пропорциональная зависимость между несущей способностью (при вдавливании F_d, и выдергивании F_{dt}) и крутящим моментом $M_к$), требуемым для их погружения F_d $(F_{dt}) = f(M_к)$ на конечном участке завинчивания, равном 50 см.
2. По результатам выполненных исследований установлены факторы, влияющие на величину $M_к$, к которым относятся: форма, конструкция, материал свай ВС (в частности, диаметр $D_л$ и шаг a лопасти), тип грунта и способ погружения сваи в него (ручной, механический), с учетом которых определены коэффициенты перехода k_{sup} (при выдергивании) и k_{inf} (при вдавливании) от момента $M_к$ к несущей способности F_d (F_{dt}) и разработан метод ее определения.
3. Предлагаемый метод оценки несущей способности F_d (F_{dt}) свай ВС по крутящему моменту завинчивания $M_к$ обеспечивает повышение точности расчетов по сравнению с известными решениями [1, 2, 8, 9 и др.], в грунтовых условиях Республики Беларусь и снижение себестоимости фундаментов не менее чем на 30 %. Отклонения значений F_d и F_{dt}, рассчитанных по предлагаемому методу, от их фактических величин не превышают 20 %. Результаты выполненных исследований вошли в разработанные рекомендации по проектированию винтовых металлических свай для зданий и сооружений в условиях Республики Беларусь [10].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пенчук, В. А. Винтовые сваи и анкеры для опор / В. А. Пенчук.– К.: Будивелник, 1985.– 96 с.
2. Иродов, М. Д. Применение винтовых свай в строительстве / М. Д. Иродов.– М.: Стройиздат, 1968.– 148 с.

3. Чернюк, В. П. Винтовые сваи и анкера в строительстве / В. П. Чернюк, В. Н. Пчелин, В. Н. Черноиван.– Минск: Ураджай, 1993.– 176 с.
4. Аль-Тамими, С. С. Х. Эффективная конструкция мелкозаглубленной винтовой металлической сваи / Саиф Сами Хуссейн Аль-Тамими // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: мат. межд. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 22–23 октября 2015 / УО «Белорусско-российский» университет; редкол: д. т. н., проф. И. С. Сазонов [и др.].– Могилев: «Белорусско-российский» ун., 2015.– С. 142.
5. Типовые конструкции, изделия и узлы зданий и сооружений. Унифицированные конструкции для закрепления опор ВЛ и ОРУ подстанций: Серия 3.407.9–158.– Введ. 28.08.88.– М.: Минэнерго СССР: Институт «Энергосетьпроект», 1988.– 23 с.
6. Основные направления социально-экономического развития Республики Беларусь на 2006–2015 годы // Белорусский правовой портал [Электронный ресурс].– Режим доступа: http://www.pravoby.info.– Дата доступа: 15.09.2008.
7. Кравцов, В. Н. Эффективность использования винтовых свай в сложных грунтовых условиях Беларуси / В. Н. Кравцов, Л. С. Чеботарь // Межд. сборник тр. Геотехника: Научные прикладные аспекты строительства надземных и подземных сооружений на сложных грунтах / СПбГАСУ; ред. Р. А. Мангушев [и др.].– СПб, 2008.– С. 186–191.
8. Проектирование и устройство свайных фундаментов: СП 50–102–2003.– Введ. 21.06.03.– М.: ЖКХ Госстроя России: Управление технического нормирования, стандартизации и сертификации в строительстве, 2008.– 81 с.
9. Железков, В. Н. Винтовые сваи в энергетических и других отраслях строительства / В. Н. Железков.– СПб.: Прагма, 2004.– 128 с.
10. Рекомендации по проектированию и строительству винтовых свай для гражданских, промышленных и инженерных сооружений в грунтовых условиях Республики Беларусь: Р 5.01.069.10–2015.– Минск: РУП «Стройтехнорм», 2015.– 69 с.

REFERENCES

1. Penchuk V. A. *Vintovye svai i ankery dlya opor* [Screw piles and anchors for supports]. Kiev: Budivelnik, 1985. 96 p. (rus)
2. Irodov M. D. *Primenenie vintovykh svay v stroitelstve* [Application of screw piles in the construction activities]. M.: Stroyizdat, 1968. 148 p. (rus)
3. Chernyuk V. P., Pchelin V. N., Chernoivan V. N. *Vintovye svai i ankera v stroitelstve* [Screw piles and anchors in the construction activities]. Minsk: Uradzhay, 1993. 176 p. (rus)
4. Al-Tamimi S. S. H. Effektivnaya konstruktsiya melkozaglublennoy vintovoy metallicheskoy svai // *Novye materialy, oborudovanie i tehnologii v promyshlennosti: mat. mezhd. nauch.–tehn. konf. molodyh uchenyh* [New materials, equipment and technologies in the industry: Proceedings of the international scientific and technological conference of young researchers], Mogilev, 22–23 oktyabrya 2015. Mogilev: «Belorussko-rossiyskiy» un., 2015. pp. 142. (rus)
5. *Tipovye konstruktsii, izdeliya i uzly zdaniy i sooruzheniy. Unifitsirovannye konstruktsii dlya zakrepleniya opor VL i ORU podstantsiy*: Seriya 3.407.9–158 [Typical constructions, articles and assemblies of buildings and structures. Unified constructions for fastening of transmission towers and outdoor switchgear of substations]. M.: Institut “Energosetproekt”, 1988. 23 p. (rus)
6. *Osnovnye napravleniya sotsialno-ekonomicheskogo razvitiya Respubliki Belarus na 2006–2015 gody* // Belorusskiy pravovoy portal [Elektronnyy resurs].–Rezhim dostupa: http://www.pravoby.info.–Data dostupa: 15.09.2008. (rus)
7. Kravtsov V. N., Chebotar L. S. Effektivnost ispolzovaniya vintovykh svay v slozhnyh gruntovyh usloviyah Belarusi. *Mezhd. Sbornik tr. Geotehnika: Nauchnye prikladnye aspekty stroitelstva nadzemnyh I podzemnyh sooruzheniy na slozhnyh gruntah* [International collection of works in geotechnical engineering: Scientific application-oriented aspects of construction activities for surface and underground structures on complex soils]. Saint-Petersburg, 2008. pp. 186–191. (rus)

8. *Proektirovanie i ustroystvo svainyh fundamentov:* SP 50–102–2003.[Piling engineering]. M.: Upravlenie tehnicheskogo normirovaniya, standartizatsii i sertifikatsii v stroitelstve, 2008. 81 p. (rus)
9. Zhelezkov V. N. *Vintovye svai v energeticheskih i drugih otraslyah stroitelstva* [Screw piles in power-engineering and other sectors of construction activities]. Saint-Petersburg: Pragma, 2004. 128 p. (rus)
10. *Rekomendatsii po proektirovaniyu i stroitelstvu vintovykh svay dlya grazhdanskih, promyshlennyh i inzhenernyh sooruzheniy v gruntovyh usloviyah Respubliki Belarus* [Recommendations for screw piles designing and construction activities for civil, industrial and engineering structures under soil conditions of the Republic of Belarus]: R5.01.069.10–2015. Minsk: RUP «Stroytehnorm», 2015. 69 p. (rus)

Статья поступила в редколлегию 24.11.2016.