МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ
НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Всесоюзный научно-исследовательский институт
по строительству магистральных трубопроводов

ВНИИСТ

РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА И ОСЕВОГО УСИЛИЯ ПРИ ПОГРУЖЕНИИ ВИНТОВЫХ СВАЙ В ГРУНТЫ

Р 462—82

ВНИИСТ

МОСКВА 1983

gost.e-ecolog.ru

УДК 624.155.2

В настоящих Рекомендациях приведена методика определения величин крутящего момента и осевого усилия - важных технологических параметров погружения винтовых свай в грунты. Точный расчет этих параметров необходим, во-первых, для проектирования эффективных конструкций винтовых свай, во-вторых, для рационального выбора и конструирования машин и механизмов для погружения винтовых свай, в-третьих, для создания условий наиболее эффективного и наименее энергоемкого заглубления винтовых свай в грунты.

Во ВНИИСТе при участии кафедры технологии строительного производства Брестского инженерно-строительного института (БИСИ) с 1968 г. проводится научно-исследовательская работа по изучению процесса погружения винтовых свай, определению технологических параметров и проектированию новых эффективных конструкций винтовых свай. На основании этих исследований разработаны настоящие Рекомендации, которые будут способствовать широкому применению винтовых свай в строительстве.

Рекомендации разработали канд.техн.наук В.В.Спиридонов (ВНИИСТ), канд.техн.наук В.П.Чернюк и инженеры В.Н.Пчелин и Р.А.Вальчук (БИСИ).

Замечания и предложения направлять по адресу, Москва, 105058 , Окружной проезд, 19, ВНИИСТ, лаборатория трубопроводов, сооружаемых в особых условиях.

© Всесоюзный научно-исследовательский институт по строительству магистральных трубопроводов (ВНИИСТ), 1983

ВНИИСТ	Рекомендации по определению крутящего момента и осевого усилия при погружении винтовых свай в грунты	Р 462-82 Впервые

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Настоящие Рекомендации распространяются на проектирование и устройство свайных опор и анкерных устройств из винтовых свай для трубопроводов и их сооружений, в том числе фундаментов башен РРЛ связи, ЛЭП и др., строящихся в районах распространения немерзлых, сезонномерзлых и вечномерзлых грунтов с сохранением (принцип I) и без сохранения (принцип II) их вечномерзлого состояния.

I.2. Рекомендации предназначены для инженеров-проектировщиков строительно-монтажных или проектных организаций, а также для строителей, занятых работами по устройству свайных фундаментов из винтовых свай.

I.3. Рекомендации могут быть использованы при определе - нии и расчете крутящих моментов и осевых усилий при погружении винтовых свай в грунты методами непосредственного завинчивания, установки в предварительно пробуренные (лидерные) или пароотгаянные скважины.

I.4. Рекомендации разработаны на основании и в развитие следующих нормативных документов:

СНиП II-I8-76 "Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Нормы проектирования";

СНиП II-I5-74 "Основания зданий и сооружений. Нормы проектирования";

СНиП II-I7-77 "Свайные фундаменты. Нормы проектирования";

"Инструкция по проектированию свайных фундаментов в условиях преимущественного распространения вечномерзлых грунтов (Якутского района)" ВСН 30-67;

"Указания по технологии погружения и методике расчета винтовых свай в условиях распространения вечномерзлых грунтов" ВСН I-43-73;

Внесено ЛОУ	Утверждено ВНИИСТом I8 июня I982 г.	Срок введения 0I.0I.I983 г.

"Руководства по технологии и методике расчета анкерных свай в условиях распространения вечномерзлых грунтов" (Р 403-80).

I.5. При проектировании свайных фундаментов из винтовых свай, кроме настоящих Рекомендаций и перечисленных нормативных документов(пп.I.4, I.IO), надлежит руководствоваться действующими нормативными документами по проектированию соответствующих конструкций.

I.6. Проект свайного фундамента из винтовых свай рассчитывают на основе инженерно-геологических и мерзлотно-грунтовых изысканий с учетом местного опыта строительства, а также с учетом результатов полевых испытаний свай.

I.7. Полевые испытания свай в вечномерзлых и немерзлых грунтах следует выполнять исходя из требований СНиП П-I8-76 и СНиП П-I7-77.

I.8. *В материалах по инженерно-геологическим изысканиям* должны быть следующие сведения, достаточные для определения величин крутящих моментов и осевых усилий:

данные, характеризующие инженерно-геологические условия строительной площадки (распространение и залегание грунтов,их состав, сложение, строение и температурный режим, толщина слоя сезонного оттаивания и промерзания, сведения о мерзлотных процессах, о климатических условиях района строительства и др.);

результаты полевых и лабораторных исследований и испытаний грунтов, включая определения их механических, прочностных и теплофизических характеристик;

исходные данные для прогнозирования возможных изменений мерзлотных и гидрогеологических условий и требования по охране природной среды и др.

I.9. При производстве работ по погружению винтовых свай в грунты запрещается нарушать растительный покров строительной площадки, поэтому в проекте должны быть предусмотрены соответствующие мероприятия.

I.IO. В целях безопасного производства работ при погружении винтовых свай в грунты следует руководствоваться следующими документами:

"Правилами техники безопасности при строительстве магистральных стальных трубопроводов" (М., Недра, 1972);

СНиП I-4-80 "Техника безопасности в строительстве";

"Руководством по технологии и методике расчета анкерных свай в условиях распространения вечномерзлых грунтов"(Р 403-80);

ГОСТ 12.3.016-79 ССБТ "Антикоррозионные работы при строительстве. Требования безопасности".

1.11. Контроль за выполнением настоящих Рекомендаций и безопасным ведением работ в период строительства и эксплуатации свайных фундаментов из винтовых свай осуществляют: инспекции Госгортехнадзора, котлонадзора, пожарная, мерзлотная и санитарная инспекции, действующие мерзлотные станции или станции, организованные заказчиком объекта в соответствии с требованиями п.1.5 СНиП II-18-76.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВЕЛИЧИН КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА И ОСЕВОГО УСИЛИЯ ДЛЯ ПОГРУЖЕНИЯ ВИНТОВЫХ СВАЙ В ГРУНТЫ

2.1. Величину осевого усилия P (расчетная схема рис.2) определяют из условия

$$P = T, \qquad (1)$$

где T - величина реактивного отпора грунта при погружении винтовой сваи, определяемая по формуле

$$T = \pi r_c^2 \sigma_{кр.i} + 2\pi r_c \sum_{i=1}^{n} \tau_i h_i, \qquad (2)$$

где r_c - наружный радиус ствола винтовой сваи, м;

i - номер слоя грунта в пределах расчетной толщи основания от дневной поверхности до нижнего торца сваи, ед.;

n - число слоев грунта, на которое разделяется толща основания в пределах боковой поверхности винтовой сваи, ед.;

h_i - мощность (толщина) i-го слоя грунта, м;

$\sigma_{кр\,i}$ - нормальное удельное давление грунта под нижним торцом винтовой сваи для i-го слоя грунта, кг·м^2;

τ_i - касательные силы сопротивления грунта по поверхности ствола сваи для i-го слоя основания от дневной поверхности, кгс/м^2.

В случае несоблюдения условия (I) (диктуемого трудностью постоянного поддерживания машиной для погружения винтовых свай равенства осевого усилия P и реактивного отпора грунта T, недостаточностью осевого усилия P, развиваемого установкой, и т.д.) дальнейший расчет крутящего момента ведут по фактическим значениям осевого усилия P.

2.2. Величину крутящего момента Мкр для погружения винтовых свай (расчетные схемы рис.3–7) вычисляют по формуле

$$M_{кр} = 2\pi r_c^2 \sum_{i=1}^{n} \tau_i h_i + \frac{Q}{2}(R_л + r_c) + \left[\frac{T-P}{\pi R_л} a + 2f(T-P) + \right.$$

$$\left. + 4\pi\tau_i (R_л^2 - r_c^2)\right]\left[\frac{R_л^3 - r_c^3}{3(R_л^2 - r_c^2)} + \frac{r_c}{2}\right], \qquad (3)$$

где $R_л$ – наружный радиус винтовой лопасти сваи, м;

a – шаг винта лопасти сваи, м;

f – коэффициент трения грунта по свае, дол.ед.;

Q – усилие резания грунта винтовой лопастью, определяемое по одной из формул:

для немерзлых грунтов

$$Q = Ch^{1,35}(1+0,15)\left(1 + \frac{\gamma - 90}{180}\right)\beta_0; \qquad (4)$$

для мерзлых грунтов

$$Q = Ch(1+0,55S)\left(1 + \frac{\gamma - 90}{150}\right)\Delta, \qquad (5)$$

где C – число ударов, характеризующее плотность грунта; определяют экспериментально с помощью ударника ДорНИИ или по табл.I, 2, в зависимости от вида грунта, гранулометрического состава, температуры и влажности, ед. (прил.3);

$h = R_л - r_c$ – глубина резания грунта, см;

S – ширина резания (толщина лопасти) у поверхности ствола сваи, см;

γ – угол резания (заострения винтовой лопасти в плане) грунта лопастью, град;

β_0 – коэффициент, учитывающий влияние угла заострения лопасти ψ (см.рис.5, прил.3) на усилие резания Q, дол.ед., определяют по табл.3 в зависимости от угла ψ (прил.3);

Δ – коэффициент, учитывающий затупление режущей части лопасти, дол.ед.; Δ =0,85 для острой режущей части, Δ =I – для слегка затупленной, Δ = 2 – для тупой.

2.3. Для определения значений крутящих моментов, необходимых для погружения винтовых свай, рекомендуется производить расчеты на ЭЦВМ.

В приложениях I, 2, 3, 4 даны соответствующие материалы.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРОГРАММА РАСЧЕТА КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ДЛЯ
ПОГРУЖЕНИЯ ВИНТОВЫХ СВАЙ В НЕМЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ

к = I00 e
к = I00 q
I. Введем m
2. Допустим к = I, x = 0, a = 0
3. Введем $e_к$ $q_к$
4. Вычислим $y = e_к - a$ $c = yq_к$ $x = x + c$ $a = 0$
5. Вставим $K = K + 1$
6. Допустим $B = K$
7. Если $B - m \leq 0$ идти к 3
8. Введем с $B\ t\ s\ z\ r\ b\ a\ p\ f\ \Phi$
9. Вычислим $Z = 1{,}35\,Ln(100(B-t))$
I0. Вычислим $y = 0{,}001rc(1+10S)(1+(z-90)/180)\,exp\,Z$
II. Вычислим $Z = b\pi t^2 + 2\pi tx$
I2. Вычислим $I = 2\pi t^2 x + y(B+t)/2$

$$Л = (Z-p)a/(\pi B) + 2f(Z-P) + 4\pi\Phi(B^2-t^2)$$

$$И = (B^3-t^3)/(3(B^2-t^2)) + t/2$$

I3. Вычислим $M = L + ЛИ$
I4. Печатаем с 6 знаками M
I5. Интервал 2
I6. Идти к I
Исполним I

Условные обозначения

m – число слоев грунта, на которое разделится толща основания вдоль боковой поверхности винтовой сваи, ед., ($m \leq$ I00);

$e_к$ – мощность (толщина) к-го слоя, м;

$q_к$ – касательные силы сопротивления грунта по боковой поверхности винтовой сваи к-го слоя, тс/м^2;

c – число ударов ударника Дорнии, ед.;

B – наружный радиус винтовой лопасти сваи, м;

t – наружный радиус ствола сваи, м;

S – ширина резания (толщина лопасти) у поверхности ствола сваи, м;

z – угол резания (заострения винтовой лопасти в плане) грунта лопастью, град;

r – коэффициент, учитывающий влияние угла заострения лопасти φ, дол.ед.;

b – нормальное удельное давление грунта под нижним торцом винтовой сваи, тс/м^2;

a – шаг винта лопасти сваи, м;

P – осевое усилие на сваю, тс;

f – коэффициент трения грунта по свае, дол.ед.;

ϕ – касательные силы сопротивления грунта по поверхности ствола сваи на глубине погружения лопасти, тс/м.

ПРОГРАММА РАСЧЕТА КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ДЛЯ
ПОГРУЖЕНИЯ ВИНТОВЫХ СВАЙ В МЕРЗЛЫЕ ГРУНТЫ

к = 100 e
к = 100 q
I. Введем m
2. Допустим к = I, x = 0, a = 0
3. Введем $e_к q_к$
4. Вычислим $y = e_к - a \quad c = y q_к \quad x = x + c \quad a = 0$
5. Вставим $k = k + 1$
6. Допустим $B = k$
7. Если $B - m \leq 0$, идти к 3
8. Введем с $B\ t\ s\ z\ r\ b\ a\ p\ f\ \Phi$
9. Вычислим $y = 0{,}001cr(1+555)(1+(z-90)/150)100(B-t)$
I0. Вычислим $Z = \pi b t^2 + 2\pi t x$
II. Вычислим $L = 2\pi t^2 x + 4(B+t)/2$

$$Л = (Z-p)a/(\pi B) + 2(Z-p)f + 4\pi\Phi(B^2-t^2)$$

$$И = (B^3-t^3)/(3(B^2-t^2)) + t/2$$

I2. Вычислим M = L + ЛИ
I3. Печатаем с 6 знаками M
I4. Интервал 2
I5. Идти к I
Исполним

Условные обозначения

m – число слоев грунта, на которое делится толща основания вдоль боковой поверхности винтовой сваи, ед. ($m \leq 100$);

$e_к$ – мощность (толщина) к-го слоя, м;

$q_к$ – касательные силы сопротивления грунта по боковой поверхности винтовой сваи к-го слоя, тс/м;

C – число ударов ударника Дорнии, ед.;

B – наружный радиус винтовой лопасти сваи, м;

t – наружный радиус ствола сваи, м;

S – ширина резания (толщина лопасти) у поверхности ствола сваи, м;

γ – угол резания (заострения винтовой лопасти в плане) грунта лопастью, град;

$\dot{r}$ – коэффициент, учитывающий затупление режущей части лопасти ψ, дол.ед.;

b – нормальное удельное давление грунта под нижним торцом винтовой сваи, тс/м;

d – шаг винта лопасти сваи, м;

P – осевое усилие на сваю, тс;

f – коэффициент трения по свае, дол.ед.;

ϕ – касательные силы сопротивления грунта по поверхности ствола сваи на глубине погружения лопасти, тс/м.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

Пример I. Определить величину крутящего момента для погружения винтовой сваи в грунт при следующих исходных данных:

глубина погружения сваи H = 3,39 м, $h_i = h_1 = 3{,}9$ м;

грунт – суглинок тугопластичный со следующими расчетными характеристиками: $f = 0{,}4$; $\sigma_{кр.i} = 135000$ кг/м^2; $\tau_i = 2600$ кг/м^2, C = I3 ударам; число слоев грунта $n = 1$; величина осевого усилия P = 3I60 кг; параметры винтовой сваи $R_{пл} = 0{,}4$ м; $r_c = 0{,}165$ м; $\delta = 6$ см; $\gamma = 135^0$, $\psi = 16^0$, a = 0,I6 м.

Решение.

По табл.I в зависимости от $\psi = 16^0$ принимаем коэффициент $\beta_0 = 0{,}81$.

Глубина резания $h = R_л - r_c = 0{,}4-0{,}165 = 0{,}235$ м = =23,5 м.

По формуле (4) определяем усилие резания грунта винтовой лопастью

$$Q = ch^{1{,}35}\left(1+0{,}1\delta\right)\left(1+\frac{\gamma-90}{180}\right)\beta_0 =$$

$$= 13 \times 23{,}5^{1{,}35}\ (1+0{,}1\times 6)\left(1+\frac{135-90}{180}\right) \times 0{,}81 = 1495{,}6 \text{ кг}.$$

По формуле (2) определяем величину реактивного отпора грунта:

$$T = \pi r_c^2 \sigma_{кр.i} + 2\pi r_c \sum_{i=1}^{n} \tau_i h_i = 3{,}14 \times 0{,}165^2 \times 135 \times 10^8 +$$
$$+ 2 \times 3{,}14 \times 0{,}165 \times 3{,}39 \times 2600 = 20673 \text{ кг}.$$

По формуле (3) вычисляем значение крутящего момента для погружения винтовой сваи:

$$M_{кр} = 2\pi r_c^2 \sum_{i=1}^{n} \tau_i h_i + \frac{Q}{2}(R_л + r_c) + \left[\frac{T-P}{\pi R_л} a + 2f(T-P) + 4\pi\tau_i (R_л^2 - r_c^2)\right]\left[\frac{R_л^3 - r_c}{3(R_л^2 - r_c^2} + \frac{r_c}{2}\right] =$$

$$= 2 \times 3{,}14 \times 0{,}165^2 (3{,}39 \times 2600) + \frac{14956}{2}(0{,}4 +$$

$$+ 0{,}165) + \left[\frac{20673 - 3160}{3{,}14 \times 0{,}4} \times 0{,}16 + 2 \times 0{,}4\ (20673 -\right.$$

$$\left. - 3160) + 4 \times 3{,}14 \times 2600(0{,}4^2 - 0{,}165^2)\right]\left[\frac{0{,}4^3 - 0{,}165^3}{3(0{,}4^2 - 0{,}165^2)} +\right.$$

$$\left. + \frac{0{,}165}{2}\right] = 1507 + 423 + 4774 = 6704 \text{ кг.}$$

Пример 2. Определить величину крутящего момента для погружения винтовой сваи на глубину H = 2,93 м с помощью программы расчета крутящего момента для немерзлых грунтов на ЭЦВМ "Наири" при следующих исходных данных:

грунт - суглинок тугопластичный;

f = 0,4; $\sigma_{кр\,i}$ = 120 т/м^2; τ_i = 2,5 т/м^2; n = 1; h_i = H = 2,93 м; C = 13; P = 2,37 т; $R_л$ = 0,4 м; r_c = = 0,165 м; δ = 0,06 м; a = 0,16 м; γ = 135°; ψ = 16°; β_0 = = 0,81.

Решение

Перфорируем на ленту исходные данные в следующей последовательности:

1 2,93 2,5 13 0,4 0,165 0,06 135 0,81 120 0,16 2,37 0,4 2,5.

Вводим в машину перфоленту с рабочей программой, затем с исходными данными. Если нет ошибок, пускаем на счет. Результат получаем в виде:

$$M_{кр} = 5{,}972893,$$

где $M_{кр} \approx$ 5,97 тм.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВЕЛИЧИН КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА И ОСЕВОГО УСИЛИЯ ДЛЯ ПОГРУЖЕНИЯ ВИНТОВЫХ СВАЙ В ГРУНТЫ

Эффективность внедрения винтовых свай в практику строительства снижается из-за отсутствия надежных, экспериментально проверенных методов расчета величин крутящего момента и осевого усилия - важных параметров технологического процесса погружения винтовых свай в грунты, недостаточной изученности вопросов совместной работы винтовых свай с грунтовым массивом, а также физической сущности явлений, происходящих в грунтах при внедрении винтовых свай.

Отсутствие достаточно убедительных и хорошо согласуемых с практикой теоретических исследований вопросов погружения, работы и расчета винтовых свай является тормозом, сдерживающим дальнейшее применение конструкций анкерных винтовых свай в качестве фундаментов и причиной некоторых разногласий и ошибок.

Известная по ТУВС -55 [I] расчетная формула обладает большими (в отдельных случаях в два и более раза) отклонениями по сравнению с опытными данными, что не позволяет рекомендовать ее в инженерных расчетах.

Предложенный И.А.Цорупой и И.М.Чистяковым [2] способ определения величины крутящего момента не учитывает целый ряд факторов погружения и параметров винтовых свай (осевое усилие, вид материала свай и т.д.) и по этой причине обладает большой погрешностью расчетов по сравнению с экспериментальными данными.

Рекомендуемая М.Д.Иродовым [3] сравнительно простая и наглядная формула расчета крутящего момента не учитывает сопротивления резания грунта лопастью при погружении свай, являющегося наиболее весомым составляющим параметром крутящего момента, и будучи увеличенной на 20%, формула дает результаты на 10-50% ниже экспериментальных.

Более подробный анализ существующих способов расчета технологических параметров погружения винтовых свай приведен в

прил.4, в котором доказана также более высокая точность расчетов по предлагаемому ниже способу определения величин крутящего момента и осевого усилия при погружении винтовых свай в грунты на основе методов математической статистики и корреляционного анализа.

Крутящие моменты, необходимые для погружения винтовых свай, достигают максимальной величины не только на большой глубине погружения сваи, но и во многих случаях при прохождении лопастью сваи наиболее плотного и прочного грунта. Поэтому расчет рекомендуется вести на самые плотные грунты, которые могут быть встречены сваей.

При погружении винтовой сваи без воздействия на нее осевого усилия машины она заглубляется в грунт вследствие опирания верхней поверхности лопасти на вышележащий грунт. За один оборот винтовая лопасть должна погрузиться на величину шага винта лопасти. Однако если машина передает свае лишь крутящий момент без осевого усилия, то за один оборот свая погружается, как правило, на величину, меньшую шага винта лопасти. При погружении сваи машиной, способной развивать осевое усилие, свая в начале погружения проходит рыхлый грунт, где за один оборот перемещается на величину, большую шага винта. Затем, по мере углубления, свая попадает в более плотные грунты с большим сопротивлением внедрению и начинает погружаться на величину, сначала равную, а затем меньшую шага винта (рис.I). Во избежание такого явления с увеличением глубины погружения необходимо увеличивать осевое усилие.

Если создать такие условия, при которых сопротивление грунта поступательному движению в любой момент погружения сваи уравновешивалось бы осевым усилием машины, то силы трения лопасти о грунт и величина крутящего момента будут наименьшими, а скорость погружения сваи наибольшей. Соответственно этому энергоемкость погружения винтовой сваи будет минимальной, а эффективность заглубления - максимальной. В этом случае свая за один оборот будет погружаться на величину шага ее винтовой лопасти.

Рассмотрим работу винтовой сваи, когда она находится в однородном (перпендикулярно оси вращения сваи) грунте с одинаковой во всех точках температурой и влажностью. Материал сваи

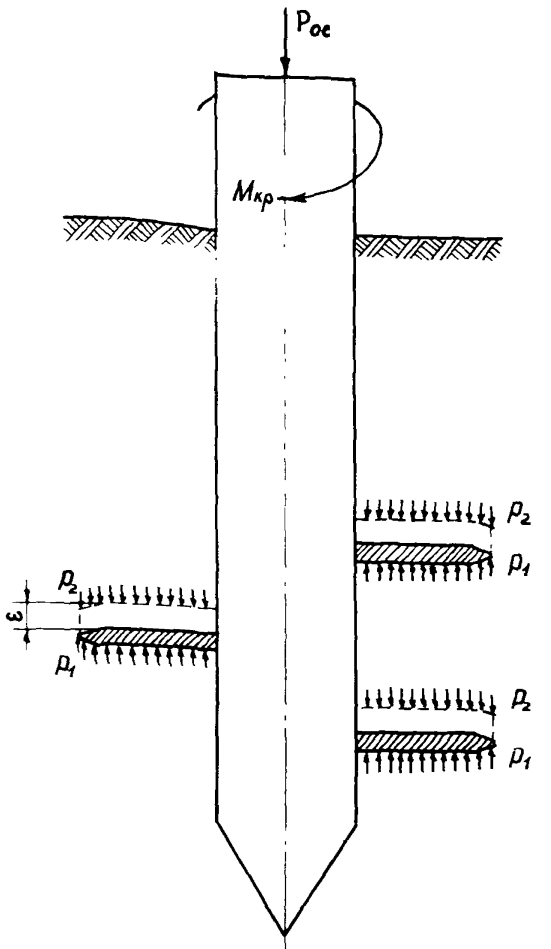

Рис.I. Схема сил, действующих при погружении винтовых свай в грунт:

P_{oc} –осевое усилие на сваю; $M_{кр}$ –крутящий момент; p_1 –опорное усилие свай; p_2 –реактивное усилие грунта; ε –перемещение лопасти вследствие сжатия грунта

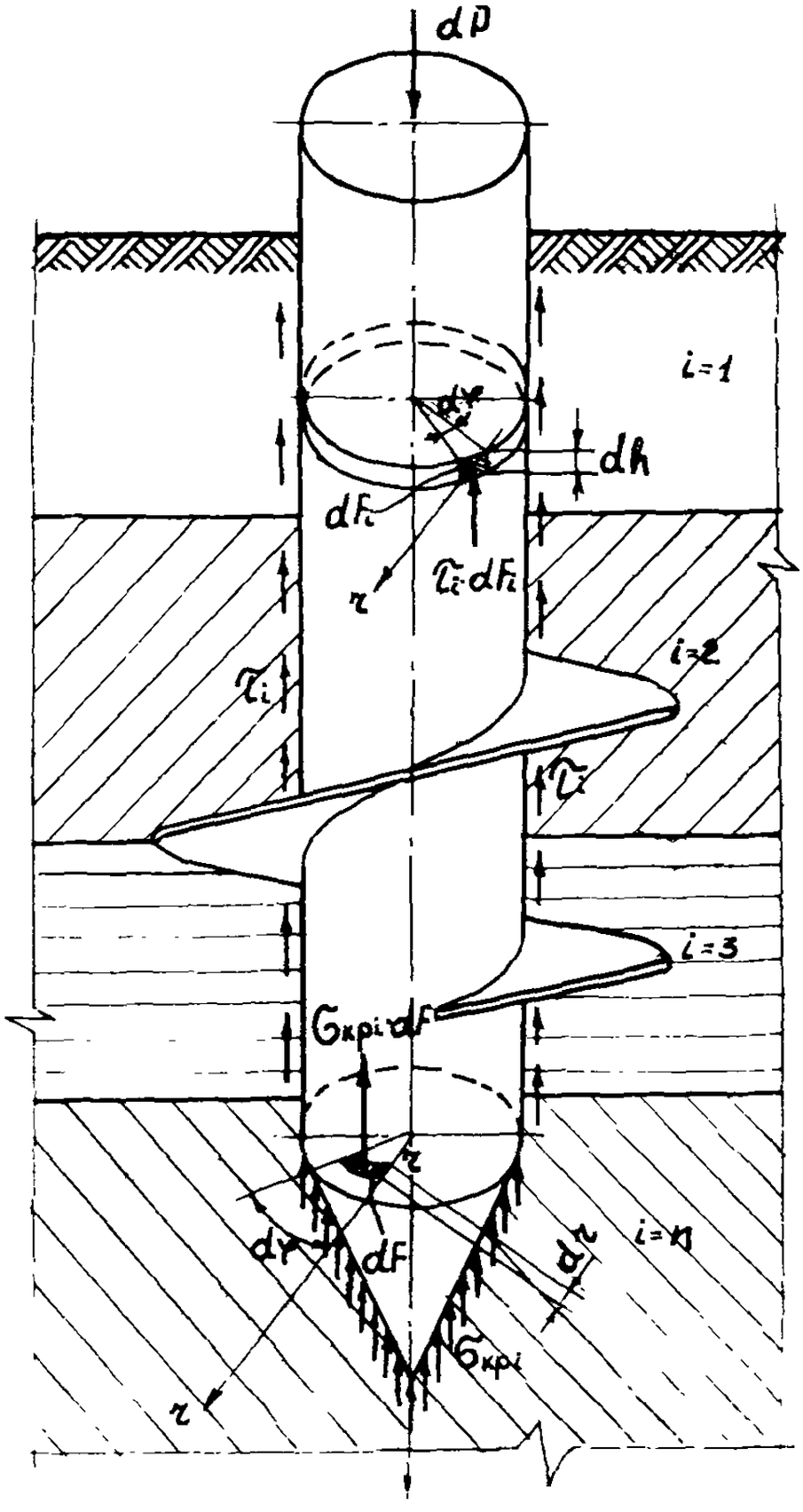

Рис.2. Расчетная схема для определения осевого усилия F

также однороден. Предположим, что касательные усилия по периметру поперечного сечения сваи и нормальные напряжения под торцом сваи распределены равномерно; ошибка от этого допущения для применяемых в практике типоразмеров винтовых свай, очевидно, будет незначительной [4,5,6]. Свая по всей длине, включая лопасть, имеет постоянные размеры и форму поперечного сечения. Лопасть винтовой сваи изготовлена с соблюдением правильности геометрических форм, без заусениц, шлаковых включений и т.д.

Учитывая эти предпосылки, предварительно определяем значение осевого усилия, а затем величину крутящего момента для требуемой или расчетной отметки погружения винтовой сваи в грунт. Расчетная схема для определения осевого усилия представлена на рис.2.

Считая, что приращение осевого усилия при погружении винтовой сваи является функцией переменных величин, записываем

$$dP_{(h,z,\varphi)} = \rho(h,\varphi) + \mathcal{E}(z,\varphi) \qquad (6)$$

или

$$dP_{(h,z,\varphi)} = \tau_i dF_i + \sigma_{кр.i} dF_i \qquad (7)$$

где $dP_{(h,z,\varphi)}$ – величина приращения осевого усилия в зависимости от переменных значений h, z, φ, кгс;

h – переменная величина изменения глубины погружения винтовой сваи, м;

φ – переменная величина поворота, рад;

z – переменная величина радиуса сваи, м;

$\rho, \mathcal{E}$ – произвольные функциональные зависимости;

τ_i – касательные силы сопротивления грунта по поверхности ствола сваи для i –го слоя основания от дневной поверхности, кгс/м^2

$\sigma_{кр.i}$ – нормальное удельное давление грунта под нижним торцом винтовой сваи для i –го слоя грунта, кгс/м^2;

i – номер слоя грунта в пределах расчетной толщи основания до нижнего торца сваи, ед.;

dF_i – элементарная площадка на боковой поверхности сваи в i –м сечении, м^2;

dF – элементарная площадка на нижнем торце винтовой сваи, $м^2$.

В дифференциальном виде уравнение (2) имеет следующий вид:

$$dP = \tau_i r_c \, d\varphi dh + \sigma_{кр.i} r dr d\varphi. \qquad (8)$$

Интегрируя обе части уравнения (3) в пределах от 0 до P и $0 \le r \le r_c$, $0 \le h \le h_i$, $0 \le \varphi \le 2\pi$ и решая его относительно P, получаем

$$\int_0^P dP = \int_0^{h_i} \int_0^{2\pi} \tau_i r_c \, dh \, d\varphi + \int_0^{r_c} \int_0^{2\pi} \sigma_{кр.i} r dr d\varphi = \qquad (9)$$
$$= \tau_i h_i 2\pi r_c + \sigma_{кр.i} \pi r_c^2.$$

В окончательном виде величину осевого усилия для погружения винтовых свай P можно определить по формуле

$$P = \pi r_c^2 \sigma_{кр.i} + 2\pi r_c \sum_{i=1}^{n} \tau_i h_i, \qquad (10)$$

где r_c – наружный радиус ствола сваи, м;

n – число слоев грунта, на которое разделяется толща основания в пределах боковой поверхности винтовой сваи, ед.;

h_i – мощность (толщина) i -го слоя, м.

Вывод формулы (5) для определения требуемого рационального осевого усилия основан на том факте, что реактивное усилие отпора грунта от погружения ствола и конуса сваи должно гаситься осевым усилием машины, погружающей винтовую сваю, т.е. T=P (где T – реактивный отпор грунта, P – осевое усилие). В действительности $T \neq P$ ($T = P$ в идеальном случае). Это влияет на крутящий момент погружения сваи. При $P > T$ крутящий момент уменьшается и наоборот.

При погружении винтовых свай в грунт работа крутящего момента в общем виде расходуется на преодоление касательных сил сопротивления грунта по боковой поверхности ствола и лопасти винтовой сваи, сил резания грунта лопастью, трения грунта о лопасть, реактивного отпора грунта.

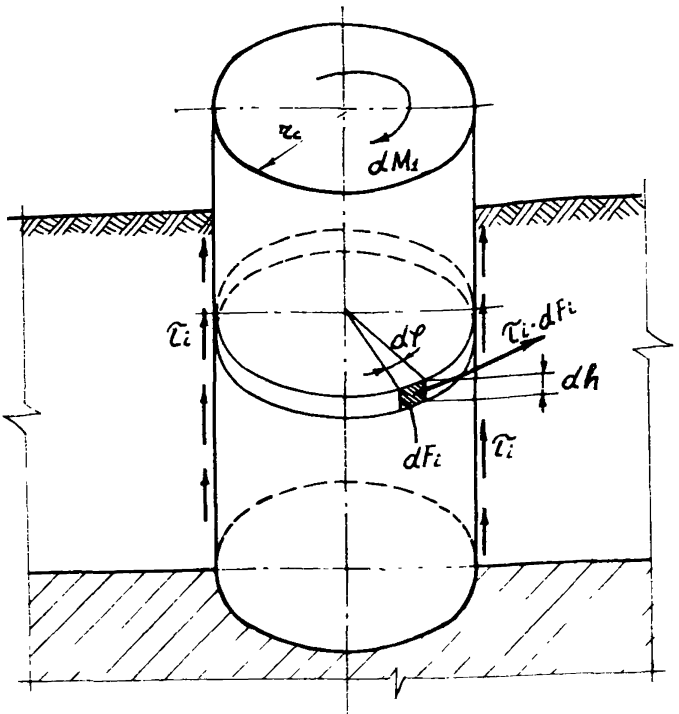

Рис.3. Расчетная схема для определения момента M_I

Таким образом,

$$M_{кр} = M_1 + M_2 + M_3 + M_4 + M_5 , \qquad (11)$$

где M_1 – момент, возникающий от сопротивления касательных сил сцепления грунта по боковой поверхности ствола винтовой сваи;

M_2 – момент, возникающий от сопротивления сил реактивного отпора грунта;

M_3 – момент, возникающий от сопротивления сил резания (прорезки) грунта лопастью;

M_4 – момент, возникающий от сопротивления сил трения грунта о лопасть;

M_5 – момент, возникающий от сопротивления касательных сил сцепления грунта по поверхности лопасти винтовой сваи.

Распишем эти составляющие крутящего момента Мкр для погружения винтовых свай. Элементарное приращение момента M_I, возникающего от сопротивления касательных сил сцепления грунта по боковой поверхности ствола винтовой сваи (рис.3), равно

$$dM_1 = \tau_i r_c dF_i. \qquad (12)$$

Учитывая, что $dF_i = r_c dh d\varphi$, и интегрируя выражение (12) в пределах от 0 до M_I, $0 \le h \le h_i$, $0 \le \varphi \le 2\pi$, в окончательном виде получаем:

$$M_1 = 2\pi r_c^2 \tau_i h_i = 2\pi r_c^2 \sum_{i=1}^{n} \tau_i h_i \qquad (13)$$

Элементарное приращение момента M_2, возникающего от сопротивления сил реактивного отпора грунта (рис.4), определяют, исходя из схемы раскладки сил на наклонной плоскости (см.рис.4,б):

$$dM_2 = \sigma tg\alpha (r + r_c) dF, \qquad (14)$$

где σ – удельное давление реактивного отпора грунта на лопасть, определяемое по формуле

$$\sigma = \frac{T - P}{\pi (R_л^2 - r_c^2)}, \qquad (15)$$

где T – расчетное усилие отпора грунта, определяемое по формуле (10), кгс;

P – фактическое осевое усилие, кгс;

$R_л$ – наружный радиус винтовой лопасти сваи, м;

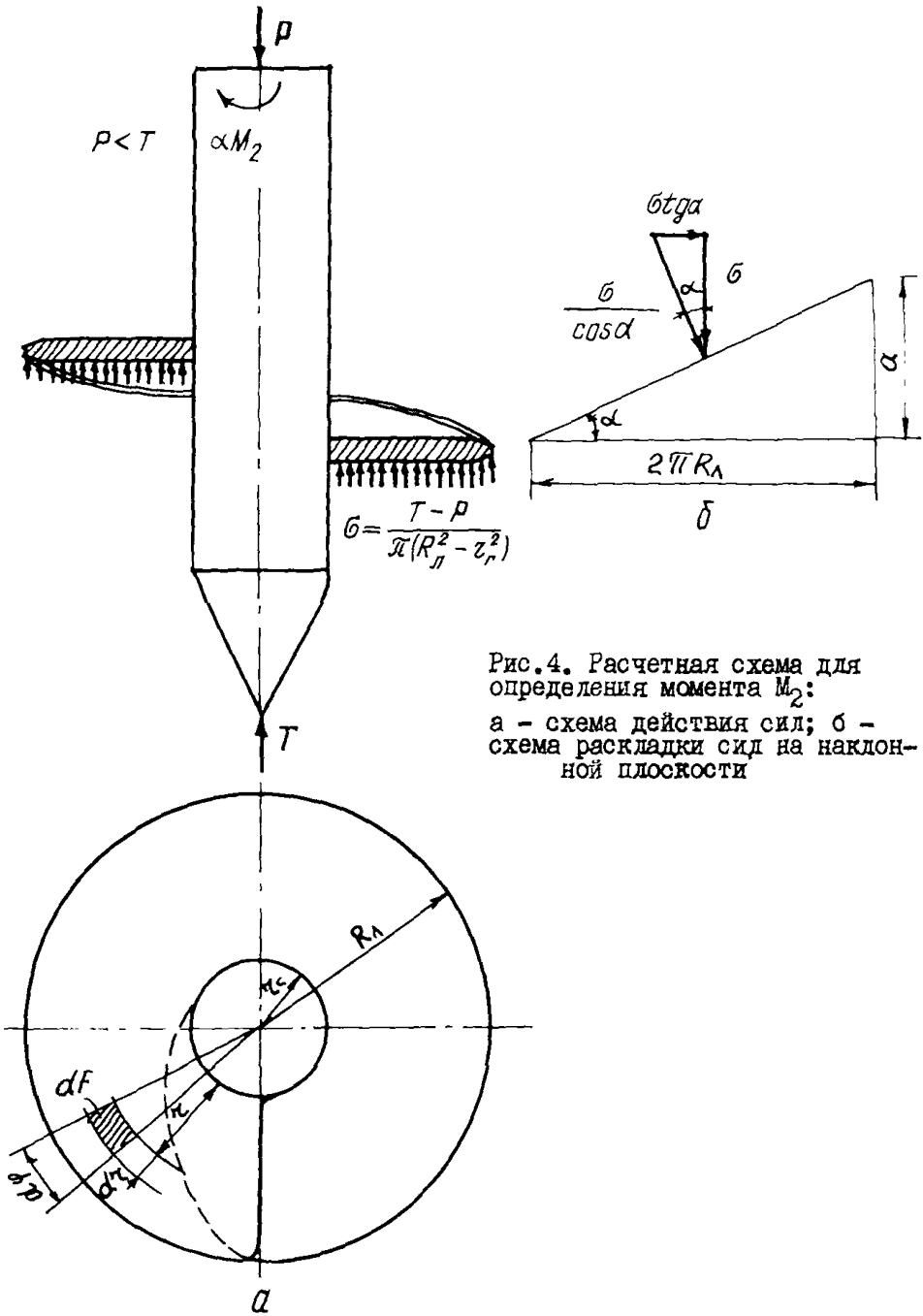

Рис.4. Расчетная схема для определения момента M_2:

а - схема действия сил; б - схема раскладки сил на наклонной плоскости

α – угол подъема витков лопасти на боковой поверхности сваи, определяемый из уравнения

$$tg\alpha = \frac{a}{2\pi R_л}, \qquad (16)$$

где а – шаг винта лопасти сваи, м.

Следует иметь в виду, что при малых углах $\alpha \leqslant 8^0$ наклона витков лопасти сваи $tg\alpha \approx \sin\alpha = a/2\pi R_л$.

Учитывая, что $dF = r\,dr\,d\varphi$, дифференциальное уравнение (14) с учетом формул (15), (16), можно записать следующим образом:

$$dM_2 = \frac{T-P}{\pi(R_л^2 - r_c^2)} \frac{a}{2\pi R_л}(r + r_c)\,r\,dr\,d\varphi. \qquad (17)$$

Решая уравнение в указанных ниже пределах, получаем

$$M_2 = \frac{T-P}{\pi(R_л^2 - r_c^2)} \frac{a}{2\pi R_л} \int_{r_c}^{R_л}\int_0^{2\pi}(r + r_c)\,r\,dr\,d\varphi = \qquad (18)$$

$$= \frac{T-P}{\pi R_л} a \left[\frac{R_л^3 - r_c^3}{3(R_л^2 - r_c^2)} + \frac{r_c}{2}\right].$$

При погружении винтовой сваи крутящий момент M_3 возникает от сопротивления сил резанию грунта лопастью, которые могут быть определены по одной из существующих методик расчета сил резания. При этом в основу каждой методики заложена определенная теория разрушения грунтов. Наиболее близкий характер по физической сущности резания дает известная в области машиностроения и механики грунтов формула А.Н.Зеленина [7,8,9], так как другие способы расчета сил разрушения грунтов применимы при углах резания меньше 90^0 (рис.5).

Таким образом, усилие резания грунта винтовой лопастью можно определить по одной из следующих формул:

<u>для немерзлых грунтов</u>

$$Q = Ch^{1,35}(1 + 0,15)\left(1 + \frac{\gamma - 90}{180}\right)\beta_0; \qquad (19)$$

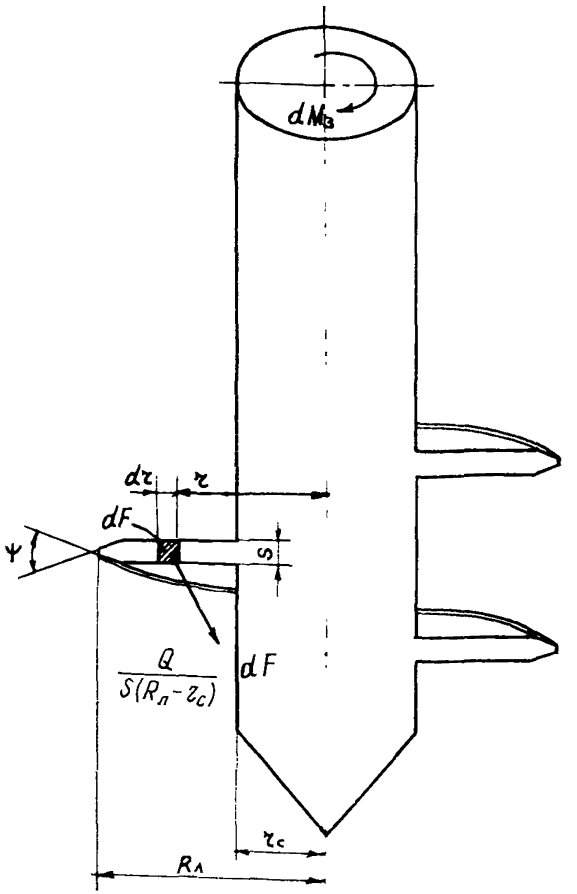

Рис.5. Расчетная схема для определения момента $M_з$

для мерзлых грунтов

$$Q = Ch\left(1 + 0{,}55S\right)\left(1 + \frac{\gamma - 90}{150}\right)\Delta, \qquad (20)$$

где C – число ударов, характеризующее плотность грунта, определяется экспериментально с помощью ударника Дорнии либо по табл.1, 2 в зависимости от вида грунта, гранулометрического состава, температуры и влажности [7], ед.;

$h = R_л - r_c$ – глубина резания грунта, см;

S – ширина резания (толщина лопасти) у поверхности ствола сваи, см;

γ – угол резания (заострения винтовой лопасти в плане) грунта лопастью, град;

β_0 – коэффициент, учитывающий влияние угла заострения лопасти ψ (см.рис.5) на усилие резания Q дол.ед. Значение β_0 приводится в табл.3 [7];

Δ – коэффициент, учитывающий затупление режущей части лопасти, дол.ед.; $\Delta = 0{,}85$ для острой режущей части, $\Delta = 1$ – для слегка затупленной, $\Delta = 2$ – для тупой.

Определим величину момента $M_з$:

$$M_з = \int_0^F \frac{Q}{S(R_л - r_c)} r \cdot dF = \int_{r_c}^{R_л} \frac{Q}{S(R_л - r_c)} S r\, dr =$$

$$= \frac{Q}{(R_л - r_c)} \int_{r_c}^{R_л} r\, dr = \frac{Q}{R_л - r_c} \left[\frac{R_л^2 - r_c^2}{2}\right] =$$

$$= Q \frac{R_л + r_c}{2} = \frac{Q}{2}(R_л + r_c). \qquad (21)$$

Для определения величины крутящего момента M_4, возникающего от сопротивления сил трения грунта по лопасти винта, предварительно необходимо определить закручивающее усилие (рис.6). Исходя из схемы раскладки сил на плоскости винта, можно записать:

$$F_{тр} = f G / \cos\alpha = N\cos\alpha + f\sin\alpha, \qquad (22)$$

отсюда

$$N = \frac{F_{тр}}{\cos\alpha + f\sin\alpha} = \frac{fG}{\cos\alpha(\cos\alpha + f\sin\alpha)} = \frac{f(T - P)}{\pi\cos\alpha(R_л^2 - r_c^2)(\cos\alpha + f\sin\alpha)}, \qquad (23)$$

где f – коэффициент трения грунта о сваю, дол.ед.

Таблица I

Экспериментальные значения числа ударов С в зависимости от вида, влажности и гранулометрического состава немерзлого грунта

Грунт	Гранулометрический состав, мм			Влажность, %	С
	0,005	0,005–0,05	0,05–3,00		
Просеянный песок	–	7,0	93,0	9,2	I,0
Рыхлая супесь	7	60,3	32,7	I4,I	I,0
То же	7	60,3	32,7	9,3	2,0
Супесь пылеватая легкая	4,3	84,3	II,4	I3,8	4,0
То же	5,2	78,4	I6,4	I6,0	3,0
Супесь тяжелая пылеватая	8,3	60,3	3I,4	I6,3	5,0
Суглинок средний	I8,3	29,I	52,6	I9,7	5,0
Растительная пылеватая супесь	II,3	8I,7	7,0	I0,4	8,0
Супесь пылеватая тяжелая	9,5	54,5	36,0	I0,0	9,0
Суглинок легкий	8,4	37,9	53,7	I0,6	I2,0
Суглинок тяжелый пылеватый	27,2	4I,6	3I,2	I6,0	I3,0
Суглинок средний	I8,7	27,3	58,0	I2,I	I4,0
Супесь пылеватая легкая	4,7	82,0	I3,3	5,3	I4,0
Глина пылеватая оподзоленная	45,3	43,9	I0,8	I9,0	I0,0
Суглинок тяжелый				I8,0	5,0
То же				I6,7	5,0
" "	22,67	57,59	I9,74	I3,8	6,0
" "				I8,6	7,0
" "				I5,5	I0,0
Оптимальная смесь (супесь)	6,69	35,7	57,65	I4,0	7,0
Суглинок легкий	8,47	32,I3	59,4	6,0	I9,0

Таблица 2

Экспериментальные значения числа ударов С для мерзлых грунтов в зависимости от их вида, температуры, влажности

Грунт	Влажность, %	Температура, °С						
		-1	-3	-5	-10	-15	-25	-40
Супесь	12,0	40-50	55-65	90-95	140-155	170-185	230-240	310-330
	15,0	65-75	105-120	150-170	200-230	270-290	330-360	420-436
	19,0	75-85	140-160	200-230	270-300	340-360	450-480	500-530
	28,0	65-75	120-130	165-190	215-230	280-300	400-420	460-480
Суглинок	10,0	28-33	34-37	36-40	40-43	43-50	50-56	70-80
	20,0	60-70	110-120	150-185	215-235	240-260	375-385	450-470
	25,0	70-80	150-160	195-220	250-280	320-340	425-460	480-520
	30,0	65-75	100-110	140-150	210-230	250-270	350-370	420-440
	59,0	40-45	50-60	75-80	110-125	165-175	220-240	285-315
Глина	17,0	35-40	70-80	100-110	150-165	180-200	250-270	290-315
	24,0	55-60	90-100	125-135	190-210	220-235	270-283	340-380
	31,0	65-70	120-130	140-160	230-250	290-310	290-320	380-420
	49,0	40-45	65-70	90-100	135-145	180-190	235-245	280-310
Песок	6,0	12-14	15-18	20-22	25-27	28-30	32-35	40-45
	8,0	25-30	35-38	40-45	50-53	55-60	60-65	70-75
	11,0	50-55	65-70	85-90	95-100	100-115	120-130	140-150
	18,0	150-160	200-210	220-230	240-250	260-280	285-300	325-340

Таблица 3

Значения коэффициентов β_0 в зависимости от угла заострения лопасти ψ

Угол заострения ψ, град	Коэффициент β_0, дол.ед.
I80	I
I20	0,96
90	0,90
60	0,83
50+I5	0,8I

Величина крутящего момента M_4, возникающего от сопротивления сил трения грунта по лопасти винта, может быть подсчитана по следующей формуле:

$$M_4 = \int_0^F N(r + r_c)\,dF = \int_{r_c}^{R_л}\int_0^{2\pi} N(r + r_c)\,r\,dr\,d\varphi = 2\pi N\int_{r_c}^{R_л}(r^2 + r r_c)\,dr = 2\pi N\left(\frac{R_л^3 - r_c^3}{3} + \frac{R_л^2 - r_c^2}{2} r_c\right) =$$

$$= \frac{2f(T - P)}{\cos\alpha(\cos\alpha + f\sin\alpha)}\left[\frac{R_л^3 - r_c^3}{3(R_л^2 - r_c^2)} + \frac{r_c}{2}\right]. \qquad (24)$$

Значение составляющей крутящего момента M_5, возникающего от сопротивления касательных сил сцепления грунта по поверхности лопасти винтовой сваи, можно вычислить по формуле (рис.7)

$$M_5 = 2\int_0^F \frac{\tau_i}{\cos\beta}(r + r_c)\,dF = 2\,\frac{\tau_i}{\cos\beta}\int_0^{2\pi}\int_{r_c}^{R_л} r(r + r_c)\,dr\,d\varphi = \frac{4\pi\tau_i}{\cos\beta}\int_{r_c}^{R_л}(r^2 + r r_c)\,dr =$$

$$= \frac{4\pi\tau_i}{\cos\beta}\left(\frac{R_л^3 - r_c^3}{3} + \frac{R_л^2 - r_c^2}{2} r_c\right), \qquad (25)$$

где β – угол наклона плоскости винта к горизонтали, град.

Подставляя значения составляющих M_1, M_2, M_3, M_4, M_5 крутящего момента Мкр из формул (I3), (I8), (2I), (24), (25) в уравнение (6), получаем

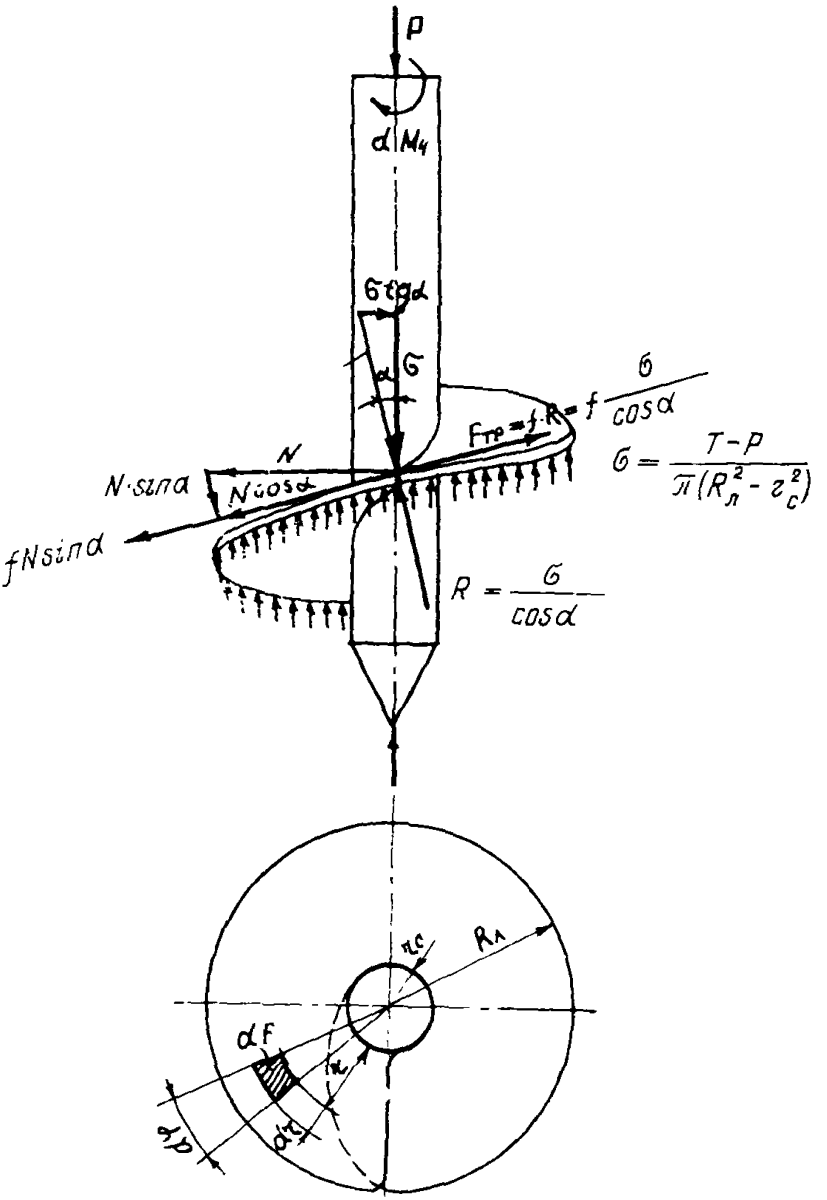

Рис.6. Расчетная схема для определения момента M_4

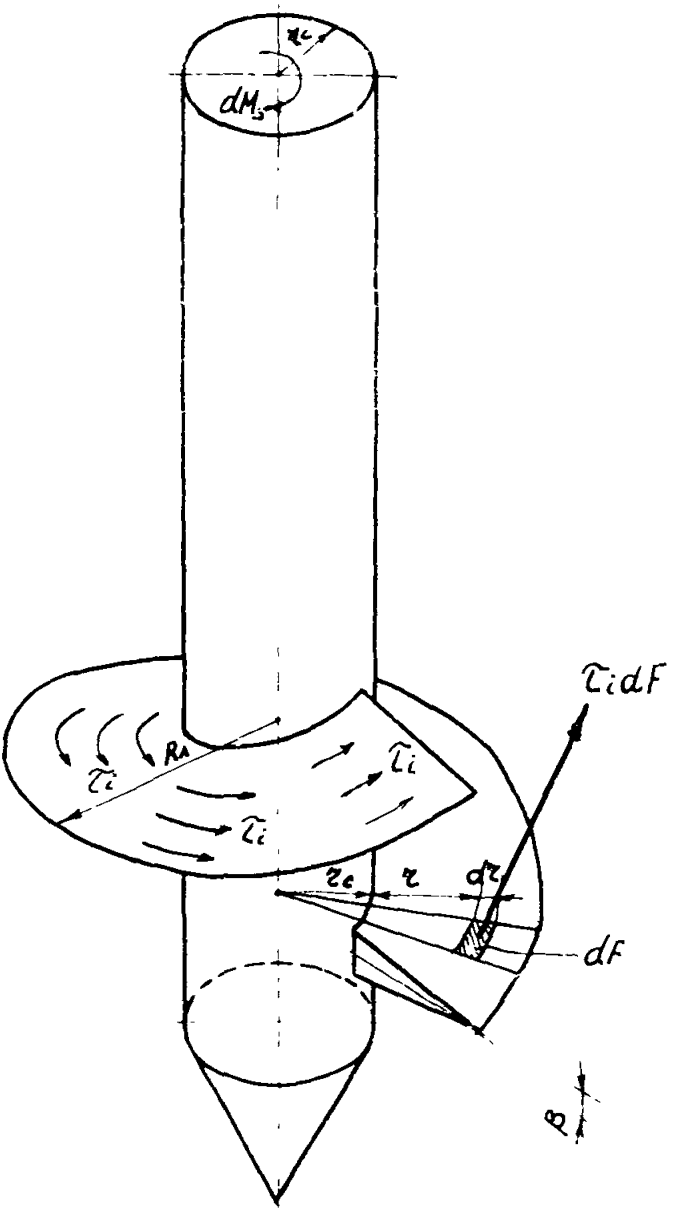

Рис.7. Расчетная схема для определения момен

$$M_{кр} = 2\pi r_c^2 \sum_{i=1}^{n} \tau_i h_i + \frac{T-P}{\pi R_л} a \left[\frac{R_л^3 - r_c^3}{3(R_л^2 - r_c^2)} + \frac{r_c}{2} \right] + \frac{Q}{2} (R_л +$$

$$+ r_c) + \frac{2f(T-P)}{\cos\alpha(\cos\alpha + f\sin\alpha)} \left[\frac{R_л^3 - r_c^3}{3(R_л^2 - r_c^2)} + \frac{r_c}{2} \right] + \frac{4\pi\tau_i}{\cos\beta} \times$$

$$\times \left[\frac{R_л^3 - r_c^3}{3(R_л^2 - r_c^2)} + \frac{r_c}{2} \right] = 2\pi r_c^2 \sum_{i=1}^{n} \tau_i h_i + \frac{Q}{2} (R_л + r_c) + \left[\frac{T-P}{\pi R_л} a + \right.$$

$$\left. + \frac{2f(T-P)}{\cos\alpha(\cos\alpha + f\sin\alpha)} + \frac{4\pi\tau_i (R_л^2 - r_c^2)}{\cos\beta} \right] \left[\frac{R_л^3 - r_c^3}{3(R_л^2 - r_c^2)} + \frac{r_c}{2} \right]. \quad (26)$$

По этой формуле получаются более точные результаты, но и она не может считаться абсолютно точной и отражающей все условия, влияющие на величину крутящего момента Мкр при погружении винтовой сваи.

Для практических расчетов формула (26) может быть упрощена. Если принять следующие допущения $\cos\alpha \approx 1$, $\sin\alpha \approx 0$, $\cos\beta \approx 1$, величина изменения которых не столь значительно влияет на конечный результат расчета, то формула (26) будет иметь вид

$$M_{кр} = 2\pi r_c^2 \sum_{i=1}^{n} \tau_i h_i + \frac{Q}{2} (R_л + r_c) + \left[\frac{T-P}{\pi R_л} a + 2f(T-P) + \right.$$

$$\left. + 4\pi\tau_i (R_л^2 - r_c^2) \right] \left[\frac{R_л^3 - r_c^3}{3(R_л^2 - r_c^2)} + \frac{r_c}{2} \right]. \quad (27)$$

Для облегчения вычислений в практических расчетах целесообразно пользоваться составленными авторами на основании формул (19), (20), (27) программами расчета на ЭЦВМ "Наири" (см. прил.1), разработанными на языке автоматического программирования.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ СПОСОБОВ РАСЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОГРУЖЕНИЯ ВИНТОВЫХ СВАЙ

Для определения величины крутящего момента, который должна развивать машина при погружении винтовых свай в грунты, имеются следующие способы и формулы расчета.

I. Формула для определения крутящего момента при завинчивании свай по ТУВС-55 [I] имеет следующий вид:

$$M_{кр} = 1{,}6\, d_c^2 \sum_{i=1}^{n} \tau_i h_i + K_1 \sigma D_л , \qquad (28)$$

где d_c – наружный диаметр ствола сваи, м;

$D_л$ – диаметр винтовой лопасти, м;

K_1 – условно принятый коэффициент плотности грунта, (для плотного гравия с песком K_1 = 50 т/м, для суглинков и глин в текучем состоянии K_1 = =25 т/м).

При погружении винтовых свай оказалось, что фактические величины крутящих моментов значительно отличаются от вычисленных по формуле (28). В связи с этим были проведены специальные исследования по определению крутящих моментов, возникающих при погружении винтовых свай машиной МЗС-I3 [3]. Замеры производили тензометрическими приборами с осциллографическими записями на пленке, фиксирующими величины крутящих моментов на карданном валу машины МЗС-I3 и на свае, скорость вращения сваи и число оборотов карданного вала. При этих исследованиях в грунт завинчивали сваи со стальными трубчатыми стволами диаметром 2I9 мм и винтовыми сварными лопастями диаметром 800 и I000 мм. Результаты исследований приведены на рис.8.

Графики на рис.8,а и б показывают, что в начале погружения винтовых свай в песчаные грунты, вычисленные по формуле (28), величины крутящих моментов Мкр значительно превышают крутящие моменты, замеренные тензометрическими приборами. При дальнейшем загублении свай в грунт замеренные крутящие моменты, наоборот, становятся больше вычисленных и на глубине 4,95м превышает их в 2 раза.

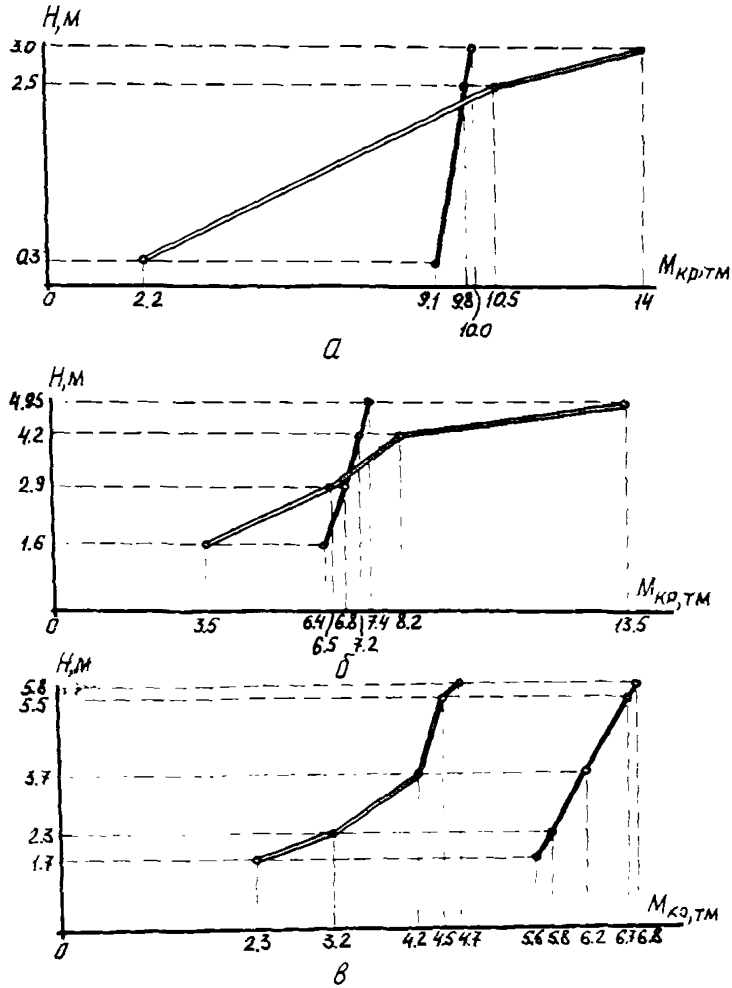

Рис.8. Графики величин крутящих моментов Мкр, вычисленных по формуле (28) и определенных по приборам:

а – для сваи с $D_д$ = 1000 мм, d_c = 219 мм, погруженной в плотный песок средней крупности; б – для сваи с $D_д$ = 800 мм, d_c = 219 мм, погруженной в песок средней крупности; в – для сваи, погруженной в моренный суглинок; ═══ – по тензометрическим приборам; —— – по формуле (28)

Для сваи, погруженной в мореный суглинок, величины крутящих моментов $M_{кр}$, вычисленные по формуле (28), на всех глубинах до 5,8 м, превышают в 1,4–2,5 раза крутящие моменты, замеренные тензометрическими приборами, причем наибольшая разница наблюдается в начале погружения сваи (см.рис.8,б).

2. Формула И.И.Дорупы и И.М.Чистякова для определения величины крутящего момента $M_{кр}$ при погружении в грунт винтовых свай имеет вид [2]:

$$M_{кр} = 2F_c Ht + 4{,}18Hf\gamma_0\left(R_л^3 - r_c^3\right) + K_c\left[\delta_{ср}\frac{R_л^2 - r_c^2}{2} + \frac{6{,}9DF_c}{F_л - F_c}\right] + 6{,}9\,\frac{Hat - G}{F_л - F_c}D, \qquad (29)$$

где $$D = 0{,}845\left(R_л^2 - r_c^2\right)a + 0{,}346\left(R_л^3 - r_c^3\right);$$

$\delta_{ср}$ – средняя толщина лопасти, м;

F_c и $F_л$ – соответственно площадь ствола и лопасти, м²;

γ_0 – объемная масса грунта, т/м³;

G – масса механизма и ствола, т;

t – трение о ствол при завинчивании, принимаемое равным 25–30% статистического значения его в данных грунтах, дол.ед.;

f – коэффициент трения, дол.ед.;

K_c – критические напряжения сжатия грунта, т/м²;

H – глубина погружения сваи, м.

Коэффициент трения f может быть принят равным:

для песка средней крупности	– 0,55–0,6;
для песка сухого	– 0,22–0,25;
для песка водонасыщенного	– 0,3–0,32;
для глин и суглинков водонасыщенных	– 0,2–0,3.

Значения K_c критических напряжений сжатия с учетом глубины сваи могут быть приняты равными:

для мелкозернистого песка	– 200–300;
для среднезернистого песка с включением гальки, гравия	– 300–400;
для супеси	– 150–250;
для глины и суглинка пластичного	– 150–200.

Формулу (29) применяли при погружении свай кабестанами. При использовании для погружения свай машины МЗС-13 величины Мкр, получаемые по формуле, значительно отличаются от измеренных.

При определении по одной из указанных формул (28), (29) величин крутящих моментов, необходимых для погружения винтовых свай, следует иметь в виду, что величины Мкр зависят также от ряда неучтенных факторов:

а) величины осевого усилия, развиваемого машиной в процессе погружения;

б) вида материалов, из которых изготовлена погружаемая винтовая свая;

в) правильности геометрических форм лопасти и ствола;

г) скорости вращения свай при погружении;

д) конструкции завинчивающей установки;

е) способа защемления ствола сваи в машине;

ж) способа погружения сваи (за голову или с помощью инвентарной трубы).

Перечисленные факторы создают очень сложные условия работы при погружении свай, трудно поддающиеся расчету.

Как показали исследования, величины крутящих моментов, определенные по аналитическим формулам (28), (29), значительно расходятся с фактическими величинами крутящих моментов, требующими для погружения винтовых свай в грунт.

3. Формула М.Д.Иродова для определения крутящих моментов при погружении винтовых свай выглядит следующим образом [3]:

$$M_{кр} = 1{,}9\, d_c^2\, H \tau_i \sec\rho + 1{,}2\left[(T-P)(0{,}2a + 0{,}7 f R_л) + 5{,}2 \tau_i R_л^3\right], \quad (30)$$

где $T = \pi r_c^2 \sigma_{кр\,i} + 2\pi r_c H \tau_i$ – реактивный отбор грунта, т;

ρ – угол наклона оси сваи к вертикали, град.

Формула (24) дает значительно меньший процент расхождения с опытными данными по сравнению с формулами (28), (29). Однако и эта формула не учитывает всех факторов погружения винтовых свай и в частности сопротивление резанию грунта лопастью, которое, как увидим дальше, составляет солидную долю общего крутящего момента. Значения $M_{кр}$, определенное по формуле М.Д.Иродова, даже увеличенное на 20%, дает результаты на 10-50% ниже

экспериментальных, замеренных тензометрическими приборами с осциллографическими записями на пленке (табл.5).

В связи с тем что формула (30) дает более точные результаты по сравнению с формулами (28), (29), ограничимся проверкой расчетных значений и сравнением результатов, подсчитанных по формуле М.Д.Миродова и формуле (27) настоящих Рекомендаций. В качестве фактических значений крутящих моментов примем экспериментальные данные М.Д.Миродова, полученные, по мнению автора, с высокой точностью определения. Исходные данные для расчетов приведены там же. В связи с тем, что в исходных данных для расчета крутящих моментов отсутствуют значения осевого усилия, предварительно по формуле (30) определим величины вдавливающих нагрузок на винтовые сваи. Сведем результаты определения осевого усилия и исходные данные для определения крутящих моментов в табл.4.

Определенные по формуле (27) с помощью ЭЦВМ "Наири" по программе расчета крутящего момента для погружения винтовых свай в немерзлые грунты и формуле (30) результаты расчетов приведены в табл.5, на основании которых построены графики сравнения результатов (рис.9, 10).

Для оценки соответствия значения, рассчитанного по формулам, и экспериментального значения, построим так называемые диагональные графики (рис.11-13). Исходя из предположения, что распределение случайных отклонений подчиняется нормальному закону распределения Гаусса, степень надежности аналитических решений в целом можно оценить с помощью относительной погрешности опыта $\mathcal{E}$, коэффициента корреляции r и среднего квадратичного отклонения S (табл.6). Причем, приведенные в табл.6 значения численных характеристик надежности теоретических решений даны для отдельных опытов $\mathcal{E}_1^1$ и $\mathcal{E}_1^2$, свай $\mathcal{E}_2^1$ и $\mathcal{E}_2^2$, грунтов $\mathcal{E}_3^1$ и $\mathcal{E}_3^2$; S_1^1 и S_1^2; r_1^1 и r_1^2 и полной серии опытов $\mathcal{E}_4^1$ и $\mathcal{E}_4^2$; S_2^1 и S_2^2; r_2^1 и r_2^2.

Как видно из табл.6, меньшая погрешность опытов $\mathcal{E}_4$, больший коэффициент корреляции r_2^2 и меньшие среднеквадратичные отклонения S_2^2 дают значения крутящих моментов, подсчитанные по формуле (27) настоящих Рекомендаций, что позволяет рекомендовать ее в инженерных расчетах.

Таблица 4

Исходные данные и значения осевых усилий для определения крутящих моментов

Глубина погружения сваи H, м	Грунт	Параметры винтовых свай						Расчетное значение осевого усилия P, т	Расчетные характеристики грунта			
		Диаметр ствола d_c, см	Диаметр лопасти $D_л$, см	Ширина резания S, см	Шаг винта лопасти a, см	Угол резания γ, град	Угол заострения лопасти ψ, град		f, дол.ед.	$\sigma_{кр} i$, т/м^2	q_i, т/м^2	C, ед.
2,93	Суглинок тугопластичный	33,0	80,0	6,0	I6	I35	I6	2,37	0,4	I20	2,5	I3
2,39		—	—	—	—	—	—	3,I6	—	I35	2,3	—
4,36		—	—	—	—	—	—	3,I5	—	I70	2,8	—
5,2		—	—	—	—	—	—	I,9	—	I90	2,9	—
6,2	—							5,6	—	205	3,0	—
2,5	—	33,0	80,0	6,0	I6	I35	I6	3	0,4	I00	2,25	I3
3,9	—	—	—	—	—	—	—	2,5	—	I60	2,6	—
4,7	—							3,7	—	I85	2,85	—
I,7	—	2I,9	80,0	6,0	I6	I35	I4	4,64	0,4	75	I,35	I3
2,3	—	—	—	—	—	—	—	4,95	—	95	2,I5	—
3,7	—	—	—	—	—	—	—	6,27	—	I50	2,85	—
5,5	—	—	—	—	—	—	—	7,94	—	I95	3,0	—
5,8	—							8,I4	—	I97	3,I	—
I,I	—	2I,9	I00,0	7,0	20	I35	I2	I,09	0,4	55	I,55	I3
2,9	—	—	—	—		—	—	4,06	—	I20	2,4	—
5,I	—	—		—	—	—	—	4,23	—	I95	2,95	—
5,9	—	—	—	—	—	—	—	4,8	—	I97	3,0	—

2,2	Песок средней и крупной плотности	33,0	80,0	60	I6	I35	I6	I2,07	0,6	320	4,2	2
2,6		—	-	—	—	—	—	I3,55	-	350	4,6	
2,85		-	—	—	-	-	-	I5,09	—	390	4,75	
2,9		-	—	-	-	-		I5,38	-	400	4,8	
1,6		2I,9	80,0	6,0	I6	I35	I4	3,44	0,6	250	3,9	2
2,9			—	—	—	-	-	4,67	—	400	4,I	
4,2		—	—	—	-	-	-	6,02	—	520	5,35	
4,9		—	—	—	-	-	—	8,66	-	550	5,55	
4,95		—	—	-	-		-	5,67	—	550	5,6	
2,6		2I,9	I00,0	7,0	20	I35	I2	3,55	0,6	380	4,6	2
3,0		—	-	—	—	—	—	3,65	—	420	4,8	

Примечание. Подсчет значений осевых усилий для погружений винтовых свай осуществлен по формуле (24).

Таблица 5

Значения величин крутящих моментов

№№ пп	Величины крутящих моментов Мкр, тм		
	По формуле М.Д.Иродова $М^{I}_{кр}$ [2],	По формуле (27) $М^{2}_{кр}$	По тензометрическим данным, Мэ
I	5,I9	5,97	7,2
2	5,89	6,70	8,2
3	7,8	8,76	9,2
4	9,46	I0,57	I0,5
5	I0,58	II,62	I2,4
6	4,03	4,70	6
7	6,92	7,87	7,8
8	8,4	9,4I	8,6
9	I,0I	I,42	2,3
I0	I,66	2,05	3,2
II	3,0I	3,35	4,2
I2	4,56	4,83	4,5
I3	4,89	5,I4	4,7
I4	I,83	2,60	2
I5	3,64	4,25	5,25
I6	6,58	6,99	8,5
I7	7,I5	7,52	8,I
I8	9,56	9,92	7,6
I9	II,22	I2,75	II,6
20	I2,45	I4,I6	I2,5
2I	I2,78	I4,54	I3,4
22	4,59	4,67	3,5
23	7,I8	7,36	6,5
24	II,I5	II,36	8,2
25	I2,8	I2,98	I3
26	I2,95	I3,I8	I3,5
27	I0,24	9,87	I0,5
28	II,62	II,20	I3,0

Примечание. Подсчет значений $Мкр^{2}$ производился на ЭВМ "Наири" по программе расчета крутящего момента для погружения винтовых свай в мерзлые грунты с точностью определения до I0.

Таблица 6

Значения численных характеристик надежности аналитических решений

Погрешность расчетных значений Мкр относительно опытных данных Мэ, %				Погрешность расчетных значений Мкр относительно опытных данных, Мэ, %				Среднеквадратичные отклонения Мкр и Мкр от Мэ, тм				Коэффициент корреляции между Мкр, Мкр и Мэ, дол.ед.			
ε_1^1	ε_2^1	ε_3^1	ε_4^1	ε_1^2	ε_2^2	ε_3^2	ε_4^2	S_1^1	S_2^1	S_1^2	S_2^2	z_1^1	z_2^1	z_1^2	z_2^2
27,92	–	–	–	I7,04	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
28,I7	–	–	–	I8,24	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
I5,22	I9,I7	–	–	4,73	9,40	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
9,90	–	–	–	0,68	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
I4,68	–	–	–	6,30	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
32,83	–	–	–	2I,62	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
II,28	I5,48	–	–	9,I6	I0,64	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,948
2,33	–	–	–	9,4I	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	
56,09	–	20,64	I7,25	38,30		I6,2I	I5,48	I,40	I,34	0,9I	I,20	0,965	0,942	0,970	
48,I3	–	–	–	36,II	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
28,33	27,48	–	–	20,29	22,I2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
I,33	–	–	–	7,42	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,04	–	–	–	9,5I	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
8,50	–	–	–	30,40	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
30,67	I8,37	20,64		I9,03	I6,I7	I6,2I		I,40		0,9I		0,965		0,970	
22,59	–	–	–	I7,75	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
II,73	–	–	–	7,27	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
25,79	–	–	–	30,49	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,92	8,68	–	–	8,06	I5,I2	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
0,4	–	–		I3,28	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,63	–		I7,25	8,52	–	–	I5,48	–	I,34	–	I,20	–	0,942	–	0,948
3I,I4	–	–		33,64	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
I0,46	–		–	I3,26											
35,98	I6,62	I2,0		38,58	I6,8I	I5,05		I,25		I,54		0,935		0,93I	–
I,54	–	–	–	0,00I	–	–	–	–		–		–		–	
4,06	–	–	–	2,32	–	–	–	–		–		–		–	–
2,48	–	–		5,99	–	–	–	–		–		–		–	–
I0,32	6,54	–	–	I3,8I	9,89	–	–	–		–		–		–	–

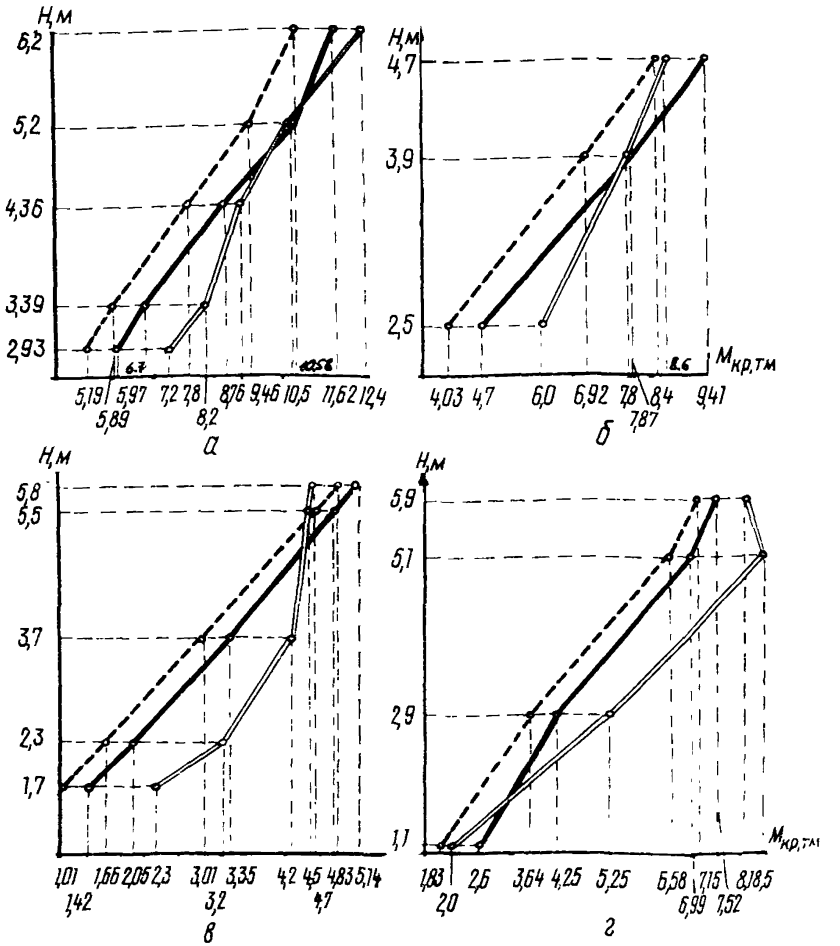

Рис.9. Графики изменения величин крутящих моментов, вычисленных по формулам (24) (— — —), (21) (———) и определенных по приборам (═══) для суглинков тугопластичных:

а–для сваи с $D_л$ =800 мм и d_c = 330 мм; б–для сваи с $D_л$ = =800 мм и d_c = 330 мм; в–для сваи с $D_л$ =800 мм и d_c =219 мм; г–для сваи с $D_л$ = 1000 мм и d_c = 219 мм

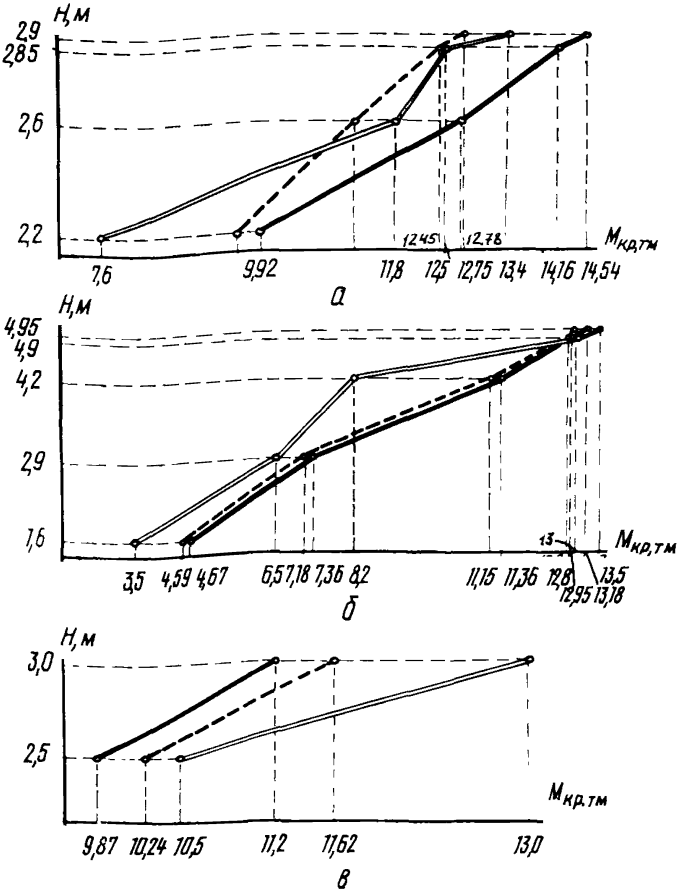

Рис.10. Графики изменения величин крутящих моментов, вычисленных по формулам (24) (- - -), (21) (——) и определенных по приборам (===) для песков средней крупности и плотности: а–для сваи с $D_л$ =800 мм и d_c =330 мм; б–для сваи с $D_л$ = =800 мм и d_c =219 мм; в–для сваи с $D_л$ =1000 мм и d_c =219мм

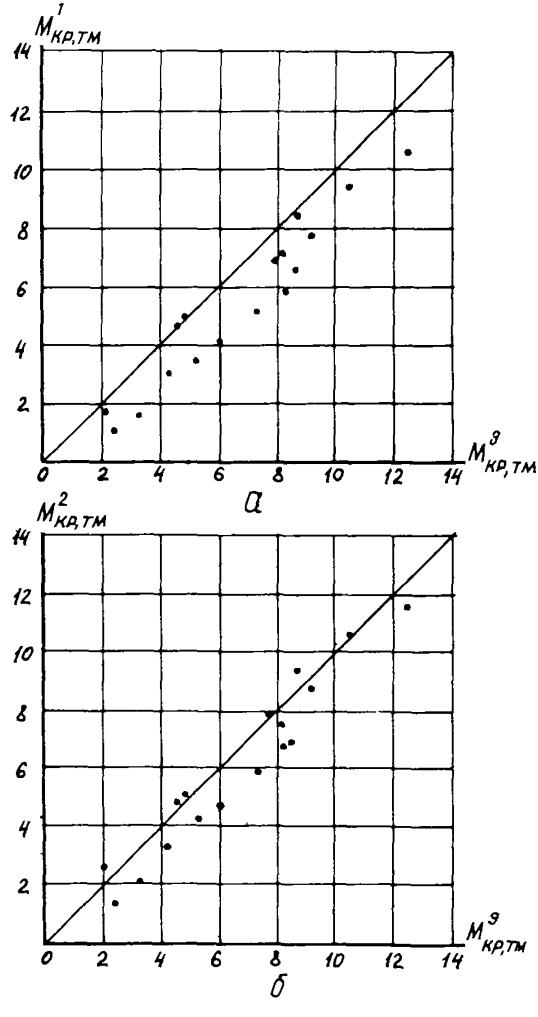

Рис.II. Диагональные графики распределения случайных отклонений для суглинка тугопластичного:
а–подсчитанных по формуле (24); z_1^1 =0,965; S_1^1 =I,40;
б– подсчитанных по формуле (21); z_1^2 =0,970; S_1^2 =0,91

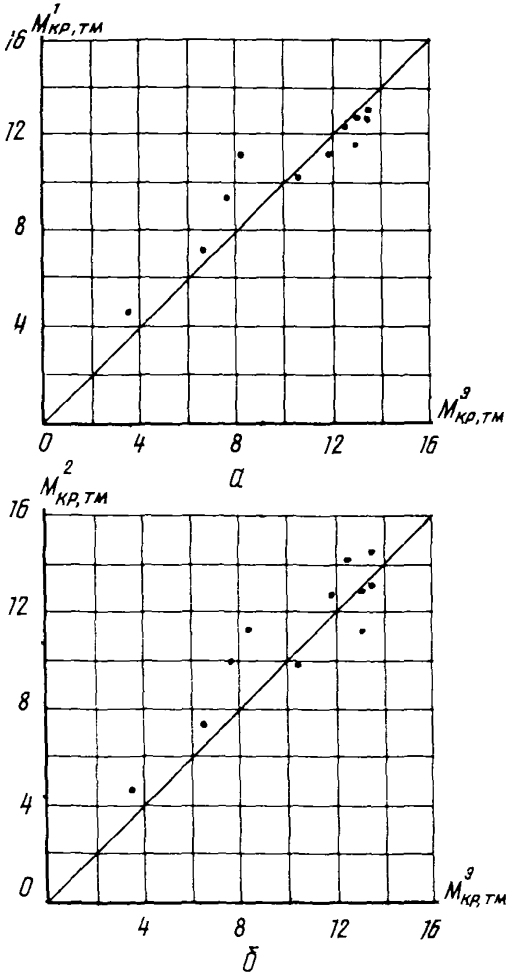

Рис.12. Диагональные графики распределения случайных отклонений для песка средней крупности и плотности:
а–подсчитанных по формуле (24); $z^1_{l_2}$ =0,935; $S^1_{l_2}$ =1,25;
б–подсчитанных по формуле (21); $z^2_{l_2}$ = 0,931; $S^2_{l_2}$ =1,54

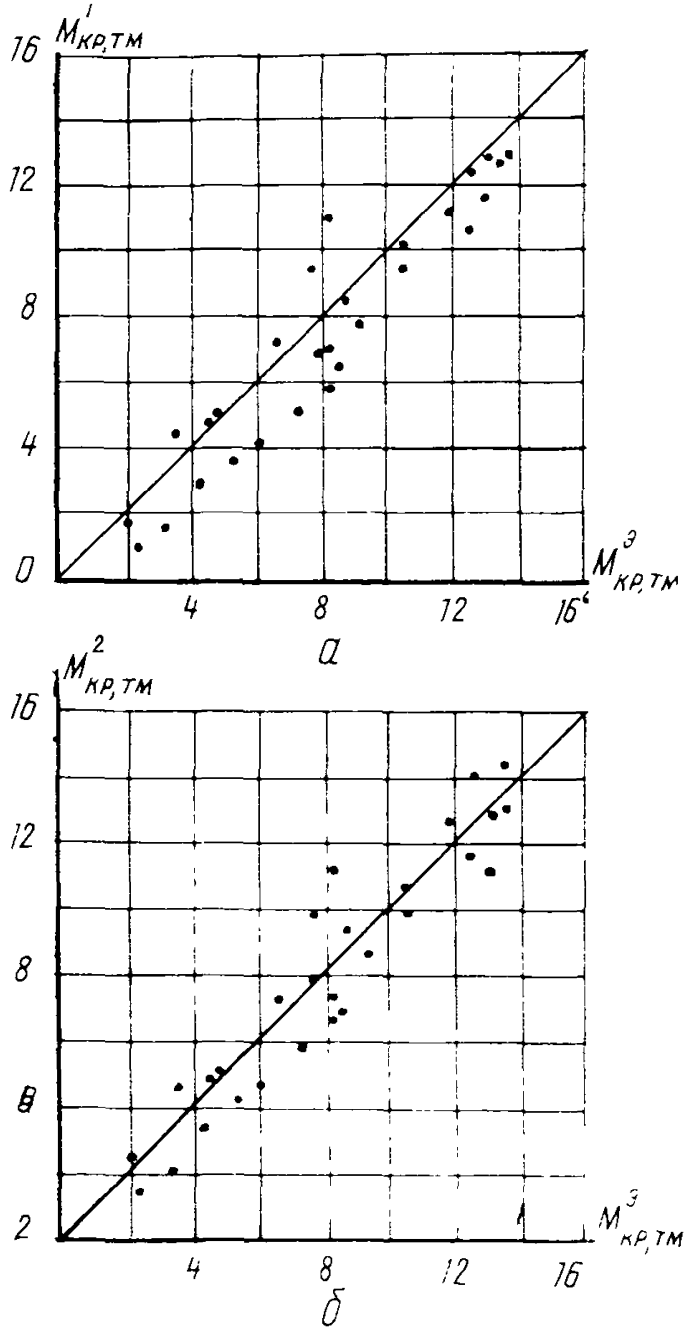

Рис.13. Сводный диагональный график распределения случайных отклонений:

а–подсчитанных по формуле (24); r'_{1} =0,942; S'_{1} =1,30;
б–подсчитанных по формуле (21); r^{2} =0,948; S^{2} =1,2

ЛИТЕРАТУРА

I. Технические указания по проектированию и устройству фундаментов опор мостов на винтовых сваях (ТУВС-55). М.,Минтрансстрой, 1955.

2. Цюрупа И.И., Чистяков И.М. Инженерные сооружения на винтовых сваях. М., Трансжелдориздат, 1958.

3. Иродов М.Д. Применение винтовых свай в строительстве. М., Стройиздат, 1968.

4. Кардымон А.П. Некоторые вопросы взаимодействия моделей и свай различной формы с мерзлыми грунтами. Труды IУ совещания-семинара по обмену опытом строительства в суровых климатических условиях. Воркута, 1966.

5. Велли Ю.Я., Карпов В.М., Иванов В.Н. Результаты полевых исследований сил смерзания мерзлых грунтов. Труды IУ совещания-семинара по обмену опытом строительства в суровых климатических условиях. Воркута, 1966.

6. Методика расчета центрально нагруженных свай. М., ОНТИ ВНИИСТа, 1970.

7. Зеленин А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами. М., "Машиностроение", 1968.

8. Зеленин А.Н., Баловнев В.И, Керов И.П. Машины для земляных работ. Основы теории разрушения грунтов, моделирование процессов, прогнозирование параметров. М., "Машиностроение", 1975.

9. Баловнев В.Н. Новые методы расчета сопротивлений резанию грунтов. М., "Машиностроение", 1963.

СОДЕРЖАНИЕ

I. Общие положения 3

2. Методика расчета величин крутящего момента и осевого усилия для погружения винтовых свай в грунты 5

Приложения 9

РЕКОМЕНДАЦИИ

по определению крутящего момента
и осевого усилия при погружении
винтовых свай в грунты

Р 462-82

Издание ВНИИСТа

Редактор Ф.Д.Остаева
Корректор Г.Ф.Великова
Технический редактор Т.В.Березнева

Л- 89898 Подписано в печать 14/Х 1983г. Формат 60х84/16
Печ.л. 3,25 Уч.-изд.л. 2,6 Бум.л. 1,625
Тираж 300 экз. Цена 26 коп. Заказ 31

Ротапринт ВНИИСТа

gost.e-ecolog.ru