

УДК 624.137.6

DOI: 10.17213/mgvgif/2026-5-412-425

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ГРУНТОВЫХ АНКЕРОВ С УЧЕТОМ ЛОБОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ. АНАЛИЗ НДС СИСТЕМЫ «ГРУНТОВЫЙ МАССИВ – АНКЕР» С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ДЛИНЕ ЗАДЕЛКИ

Н. А. Афанасьев, А. И. Харичкин, Д. Ю. Соловьев

НИИОСП им. Н. М. Герсевича, г. Москва, Россия

АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия

Аннотация. Применение грунтовых анкеров широко распространено в геотехническом, гидротехническом, транспортном строительстве. Одним из расчетных положений при проектировании анкеров является определение несущей способности по грунту. Существующие расчетные методики используют ряд допущений и упрощений. Это приводит к существенно меньшим значениям несущей способности по сравнению с натурными испытаниями. Также за несущую способность принимается сопротивление боковой поверхности заделки, а лобовое сопротивление не учитывается. В связи с этим вопрос достоверного определения несущей способности аналитическими методами остается открытым.

В настоящей работе выполнено численное моделирование испытаний грунтовый анкеров с различной длиной заделки. Выполнен анализ НДС системы «анкер – грунтовый массив» и сопоставление критической выдерживаемой нагрузки на анкер с приращением нормальных касательных напряжений в окружающем массиве в предельном состоянии.

По результатам исследований получено, что срыв анкера происходит по поверхности сдвига, расположенной на некотором расстоянии от заделки, а не по контакту «бетон – грунт». Форма поверхности сдвига представляет собой усеченный конус с основаниями в виде эллипсов, развитых в горизонтальной плоскости. Также определена эффективная площадь лобового сопротивления, характеризующая лобовое сопротивление, которое вносит вклад в общую несущую способность.

Ключевые слова: проектирование, численное моделирование, геотехника, несущая способность, грунтовый анкер, заделка, корень

THE GROUND ANCHOR BEARING CAPACITY INCLUDING THE FRONTAL RESISTANCE. STRESS-STRAIN STATE ANALYSIS OF THE «SOIL-ANCHOR» SYSTEM BY NUMERICAL MODELLING

N. A. Afanasev, A. I. Kharichkin, D. Yu. Soloviev

Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP),
Moscow, Russia

«Research Center of Construction» JSC, Moscow, Russia

Annotation. Grouted ground anchors are extensively used in geotechnical, hydraulic and transport construction. One of the fundamental design aspects is the bearing capacity determination. Existing methods are based on design assumptions and simplifications and do not account for all relevant factors. The calculated bearing capacity is substantially lower

than that obtained from testing. According to the main design principle, the bearing capacity is taken as the ultimate ground-grout skin resistance of the cylindrical fixed length. The frontal resistance is not considered. The accurately determining bearing capacity problem remains relevant.

In the present work, ground anchor tests with various fixed lengths was performed by numerical modeling. The critical pullout load was compared with the increments of normal and shear stresses at failure.

At the ultimate limit state, anchor failure occurs along a failure shear surface situated at some distance from the fixed length, and not at the "concrete-soil" contact. The failure shear surface takes a truncated cone form, whose bases are ellipses. The effective frontal resistance area was determined. It characterizes the frontal resistance, which contributes to the total bearing capacity.

Keywords: *design, numerical modelling, geotechnics, bearing capacity, ground anchor, fixed length, bond length*

Введение

Современные тенденции освоения городов и территорий часто диктуют необходимость устройства сооружений, удерживающих перепад высот, либо воспринимающих давление грунтов. Одним из типов крепления таких конструкций являются инъекционные грунтовые анкеры, применение которых распространено в геотехническом (подпорные стены, ограждения котлованов, противооползневая защита, фундаменты, воспринимающие выдергивающие нагрузки), гидротехническом (причалы, берегоукрепления), транспортном строительстве (обделки тоннелей).

Грунтовый анкер — геотехническая конструкция, воспринимающая выдергивающие нагрузки от закрепляемой конструкции, предназначенная для передачи этих нагрузок на несущие слои грунта. В классическом понимании конструкции грунтовый анкер состоит из трех частей: заделка (корень), свободная длина, оголовки.

В российской технической литературе наиболее полная классификация грунтовых анкеров представлена в ВСН 506-88, СП 381.1325800.2018, СТО 2.5.126-2013.

Проектирование любых строительных конструкций должно осуществляться на основе принципов обеспечения безопасности, долговечности и экономической эффективности. Одним из расчетных положений при проектировании грунтовых анкеров является определение несущей способности по грунту. Существующие расчетные методики определения несущей способности [1, 2] используют ряд допущений и упрощений. Такой подход приводит к существенно меньшим расчетным значениям несущей способности по сравнению с результатами натурных испытаний. Однако иногда полученные расчетом значения выше, что недопустимо [1, 3].

Важно подчеркнуть, что в расчетных методиках за несущую способность принимается сопротивление боковой поверхности цилиндрического тела заделки анкера (BSH 506-88, СП 381.1325800.2018, DIN 1054:2005, [1, 4]). В общем виде формула определения несущей способности анкера F_d , кН:

$$F_d = F_q = f(D_f, L_f, q), \quad (1)$$

где F_q — сопротивление по боковой поверхности, кН; D_f — диаметр заделки анкера, м; L_f — длина заделки анкера, м; q — удельное боковое сопротивление, кПа.

Грунтовые анкеры изготавливаются по различным технологиям. В работе [5] выделено четыре типа грунтовых анкеров (рис. 1). Форма заделки анкера зависит от технологии его устройства и влияет на характер передачи нагрузки на грунт.

Тип А — Грунтовый анкер с прямой заделкой. Форма заделки — условно правильный цилиндр, соответствующий форме и размерам скважины. Нагрузка на грунт передается только по боковой поверхности.

Тип В — Низконапорный грунтовый анкер. При низком давлении нагнетания раствор локально уплотняет грунт, увеличивая диаметр заделки.

Тип С — Высоконапорный грунтовый анкер. Цементация анкера выполняется под высоким давлением. За счет гидроразрыва увеличивается эффективный диаметр анкера. Такие анкеры могут изготавливаться по технологии пост-граутинга.

Тип D — Анкеры с механическими уширениями. За счет увеличенного диаметра несущая способность включает трение по боковой поверхности и лобовое сопротивление. Подход справедлив при шаге уширений не более трех их диаметров.

В зависимости от технологии устройства анкера фактическая величина диаметра заделки может существенно отличаться от диаметра бурения скважины и проектного диаметра. Также отмечается, что срыв анкера может происходить не по контакту «заделка – грунт», а на некотором расстоянии от заделки. В таком случае целесообразно ввести термин «эффективный диаметр», отличный от проектного диаметра заделки, который следует закладывать при расчетах несущей способности.

Для анкеров с типа *В*, *С*, *D* характерно лобовое сопротивление F_R , кН, влияющее на несущую способность. В таком случае несущую способность анкера следует определять по формуле

$$F_d = F_q + F_R = f_1(D_f, L_f, q) + f_2(D_f, d, R), \quad (2)$$

где d — диаметр свободной длины, м; R — удельное лобовое сопротивление, кПа.

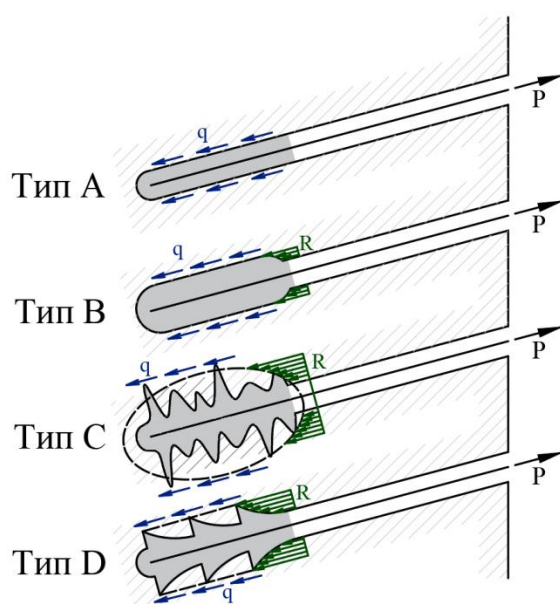


Рис. 1. Типы грунтовых анкеров [5]

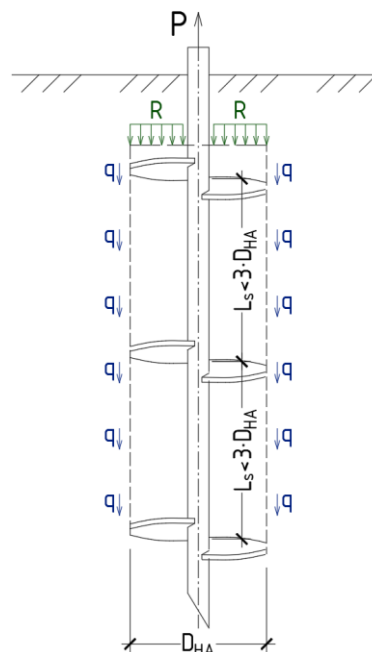


Рис. 2. Форма сдвига многолопастной сваи [6-8]

Аналогичный подход встречается при определении несущей способности многолопастных свай. При шаге лопастей до трех диаметров срыв происходит по поверхности образованного грунтового цилиндра (рис. 2). Лобовое сопротивление выдергиванию верхней лопасти также учитывается [6–8].

Проводя аналогию с работой на вдавливание висячих свай, чья несущая способность является суммой сопротивления грунтов на ее боковой поверхности и грунтов основания под пятой сваи, можно сказать следующее. Для анкеров, заделка которых изготавливается, например, с цементацией под высоким давлением (в том числе при вторичной инъекции), либо с разбуhrиванием, либо с применением разрядно-импульсной технологии (РИТ), характерен существенно больший диаметр заделки по сравнению с диаметром бурения лидерной скважины. Таким анкерам свойственен отпор заделки, который вносит вклад в несущую способность.

В российской и иностранной литературе, освещающей вопрос сопротивления грунтов как несущую способность анкерных и свайных конструкций, встречаются различные термины, обозначающие аналогичные процессы (эффекты и явления) сопротивления грунта внешним воздействиям. Термин «лобовое сопротивление (F_R)» введен авторами с целью однозначности обозначения и исключения синонимов.

Под лобовым сопротивлением подразумевается сопротивление выдергиванию торца заделки анкера, возникающее вследствие реакции грунтового массива на внешнее воздействие, которое характеризуется приращением нормальных напряжений перед торцом заделки анкера.

Согласно современным нормативным документам несущую способность анкера необходимо определять пробными испытаниями, а затем подтверждать приемочными и контрольными. Считается, что расчетные методики допускается применять лишь для предварительной оценки. Такой подход приводит к существенному занижению проектной несущей способности по сравнению с результатами испытаний.

Цель данной работы – исследование изменения НДС грунта в лобовой зоне анкера, определение эффективных диаметров (эффективной площади) лобового сопротивления и определение влияния лобового сопротивления при определении расчетной несущей способности.

В настоящей работе выполнено численное моделирование системы «анкер – грунтовый массив». Грунтовые анкеры с различной длиной заделки (1,5...15 м) нагружались осевой ступенчатой выдергивающей нагрузкой до срыва. Выполнен анализ НДС системы «анкер – грунтовый массив» и сопоставление критической выдергивающей нагрузки на анкер P_{cr} с приращением нормальных и касательных напряжений в окружающем массиве грунта при наступлении предельного состояния.

Результатом работы является закономерность формирования поверхности сдвига в грунте вокруг заделки анкера с учетом лобового сопротивления, а также оценка влияния лобового сопротивления анкера на общую несущую способность по грунту.

Материалы и методы

В рамках настоящей работы выполнено численное моделирование испытаний с помощью программы *Plaxis 3D*, основанной на методе конечных элементов. Общий вид численной модели системы «грунтовый массив – анкер» представлен на рис. 3. Границы модели приняты так, чтобы минимизировать их влияние на результат. Расчеты выполнены для анкеров с заделкой различной длины от 1,5 до 15 м.

Анкеры приняты с горизонтальным заложением. Глубина заложения – 6,0 м. Диаметр анкера – 250 мм. Технологические особенности устройства анкеров не учтены.

Заделка анкера замоделирована объемным цилиндрическим телом с характеристиками бетона (E , ν , ρ). На контакте «бетон – грунт» задан контактный элемент «*Interface*» со значением $R_{int} = 1,0$. Тяга замоделирована элементом «*Embedded beam*».

Участок свободной длины не моделировался, поскольку ее диаметр существенно меньше диаметра заделки. Также классический подход к проектированию анкеров подразумевает отсутствие сопротивления выдергиванию анкера на участке свободной длины за счет конструктивных мероприятий (наличие скользящих оболочек).

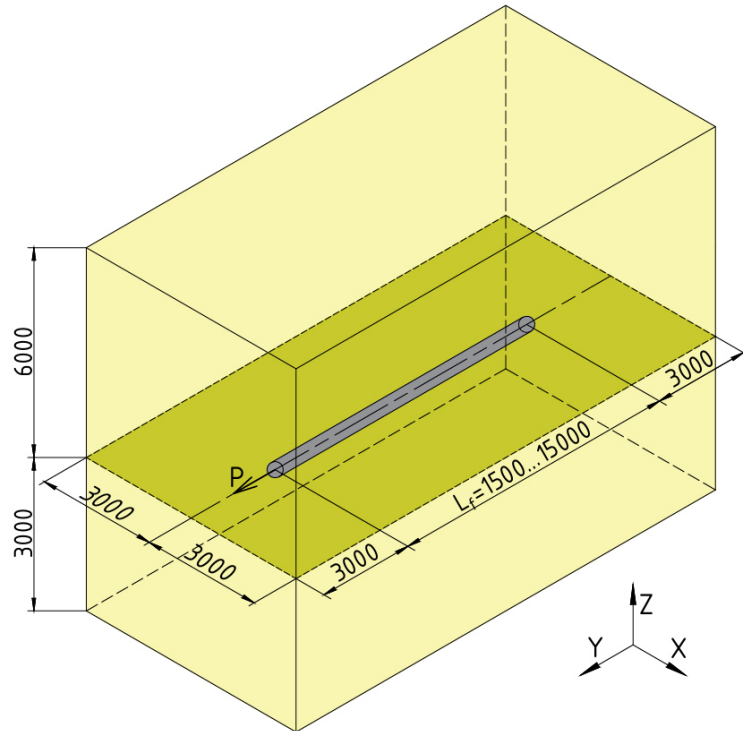


Рис. 3. Общий вид построенной конечно-элементной модели

Тип грунта — песок средней крупности, средней плотности ($\gamma = 17 \text{ кН/м}^3$). Модель грунта – упругая идеально-пластическая модель Мора–Кулона, учитывающая прочностные и деформационные характеристики: $c = 2 \text{ кПа}$, $\varphi = 30^\circ$, $E = 25 \text{ МПа}$, $\nu = 0,3$.

В ходе моделирования испытаний анкер нагружался выдергивающей нагрузкой, что отражает принцип работы анкеров в удерживающих сооружениях.

За несущую способность анкера F_d принято значение критической нагрузки P_{cr} , которая соответствует этапу, предшествующему срыву, когда система находится в предельном состоянии. Критическая нагрузка P_{cr} определялась с точностью 5 кН.

Анализ НДС включал рассмотрение приращений касательных напряжений на боковой поверхности заделки $\Delta\tau$ и приращений нормальных горизонтальных напряжений в зоне лобового сопротивления заделки $\Delta\sigma_{hor,g}$. По результатам был выполнен расчет предельного сопротивления выдергиванию F'_d согласно формуле (3).

Согласно формуле (2), величина предельного сопротивления выдергиванию в интегральной форме имеет вид:

$$F'_d = F'_q + F'_R = \int_0^{L_f} \Delta\tau dA_{L_f} + \int_0^{r_f} \Delta\sigma_{hor,g} dA_f \quad (3)$$

где A_{L_f} – площадь боковой поверхности заделки; $r_f = D_f/2$ – радиус заделки анкера; A_f – площадь поперечного сечения заделки.

Эти значения сравнивались с критической нагрузкой P_{cr} .

Результаты и обсуждения

Графики зависимости перемещений анкера от приложенной нагрузки $u_i = f(P_i)$, полученные численным моделированием испытаний, представлены на рис. 4.

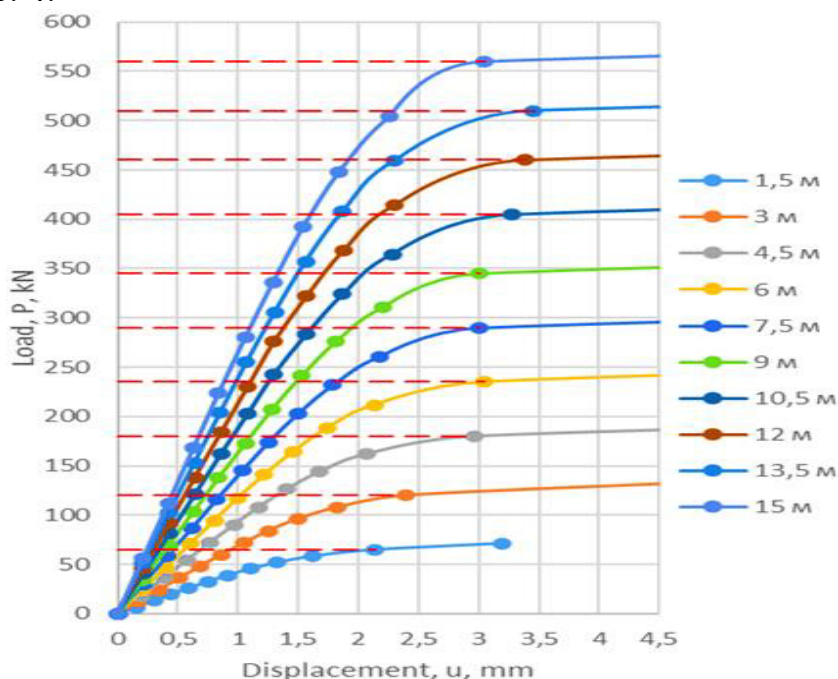


Рис. 4. График зависимости перемещений от нагрузки

Анализ касательных напряжений. Оценка сопротивления анкера по боковой поверхности F_q выполнена на основании приращений касательных напряжений $\Delta\tau$ в вертикальной и горизонтальных плоскостях. Максимальные касательные напряжения в вертикальной плоскости формируются на контакте «бетон – грунт», а в горизонтальной — на некотором расстоянии от заделки (рис. 5).

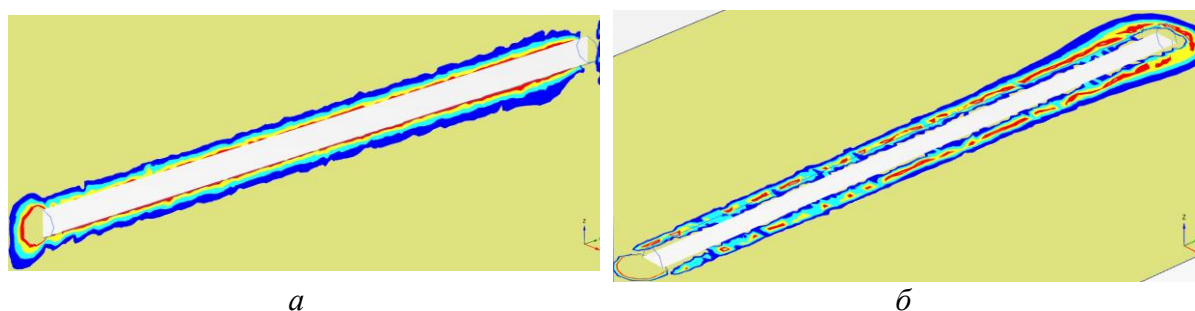


Рис. 5. Характер распределения касательных напряжений:
а — в вертикальной плоскости; б — в горизонтальной плоскости

Тогда в горизонтальной плоскости срыв анкера происходит не по контакту «бетон – грунт», а на некотором расстоянии от анкера. Форма поверхности срыва имеет форму усеченного конуса, основаниями которого явля-

ются эллипсы, развитые в горизонтали (рис. 6). Большее основание характерно удаленному концу. Поверхность сдвига ограничивает тело сдвига, включающее заделку и некоторый массив грунта.

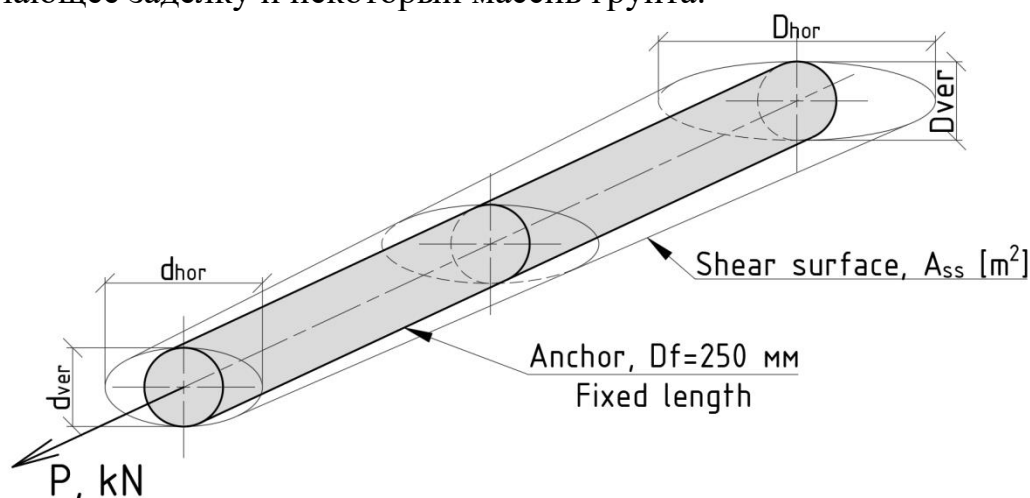


Рис. 6. Общий вид поверхности сдвига

В горизонтальной плоскости определены эффективные диаметры на удаленном конце D_{hor} и на границе со свободной длиной d_{hor} (рис. 7). Их анализ говорит о том, что полученная поверхность сдвига имеет аналогичный характер для анкеров различной длины. Значения эффективных диаметров возрастают с увеличением длины заделки.

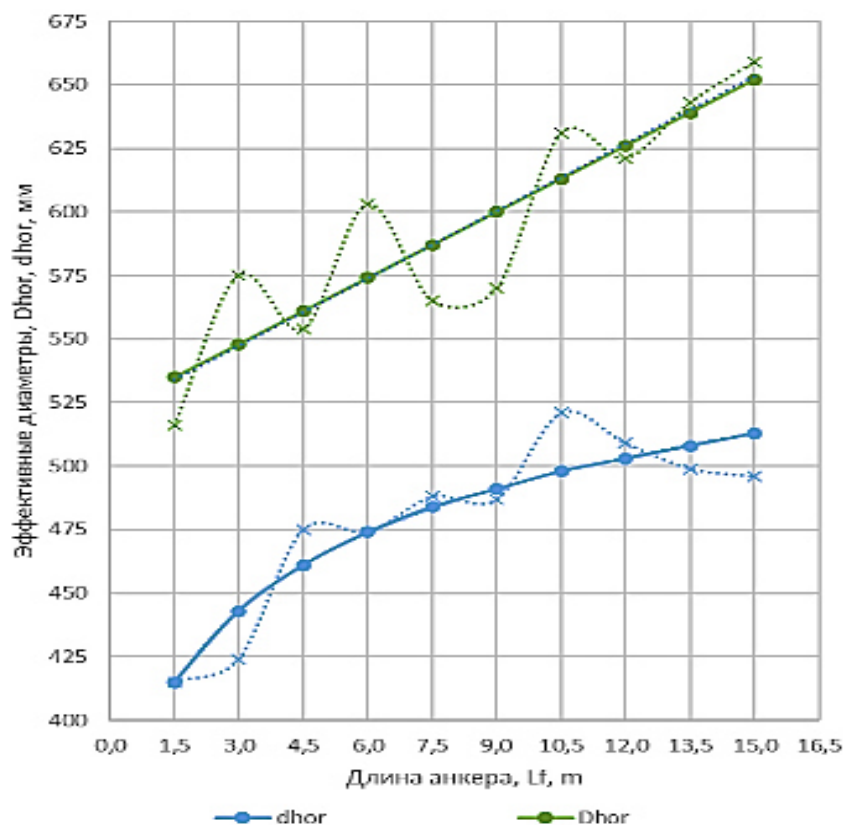


Рис. 7. Эффективные диаметры

В предельном состоянии средние касательные напряжения в вертикальной плоскости τ_{cr}^{ver} принимают значения равные 62 кПа, а в горизонтальной плоскости — $\tau_{cr}^{hor} = 40,5$ кПа. Соответственно, с учетом $\tau_0 = 25,5$ кПа приращения $\Delta\tau_{cr}^{ver} = 36,5$ кПа, $\Delta\tau_{cr}^{hor} = 15$ кПа. Значения касательных напряжений на удаленном конце выше, чем в середине и в начале заделки (рис. 5), что соответствует результатам исследований [4].

Таким образом, расчет сопротивления заделки анкера по боковой поверхности F_q представлен в табл. 1 и выполняется в соответствии с рис. 6 по формуле

$$F_q = \int_0^{L_f} \Delta\tau dA_{ss} \quad (4)$$

где A_{ss} — площадь боковой поверхности сдвига, m^2 .

Таблица 1. Определение бокового сопротивления анкера F_q

L_f , м	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15
D_{hor} , мм	535	548	561	574	587	600	613	626	639	652
d_{hor} , мм	415	443	461	474	484	491	498	503	508	513
D_f , мм	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
A_{ss} , m^2	1,75	3,62	5,55	7,54	9,58	11,67	13,80	15,97	18,19	20,46
$\Delta\tau$, кПа	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8	28,8
F_q , кН	50,4	103,9	159,6	216,8	275,5	335,4	396,8	459,2	523,0	588,3

Анализ лобового сопротивления заделки анкера F_R основан на приращениях нормальных горизонтальных напряжений $\Delta\sigma_{hor,g}$. В предельном состоянии перед заделкой образуется зона концентрации напряжений (рис. 5). В вертикальной плоскости область мобилизации напряжений сдвига на границе «свободная длина – заделка» резко увеличивается – эффективный диаметр в вертикальной плоскости больше диаметра заделки. Эффективные диаметры лобового сопротивления в вертикальной d'_{ver} и горизонтальной плоскостях d'_{hor} представлены на рис. 8.

Лобовое сопротивление F_R следует разделить на составляющие: F_{R1} — величина отпора в пределах лобовой проекции заделки анкера, F_{R2} — величина отпора от грунтового тела сдвига. Расчет лобового сопротивления выполняется согласно схеме, представленной на рис. 10:

$$F_R = F_{R1} + F_{R2} = \int_0^{r_f} \Delta\sigma_{hor,g} dA_f + \int_{r_f}^{r_{eff}} \Delta\sigma_{hor,g} dA_{eff} \quad (5)$$

где r_{eff} — радиус эффективной площади лобового сопротивления, A_{eff} — эффективная площадь лобового сопротивления.

Результаты расчетов представлены на рис. 9.

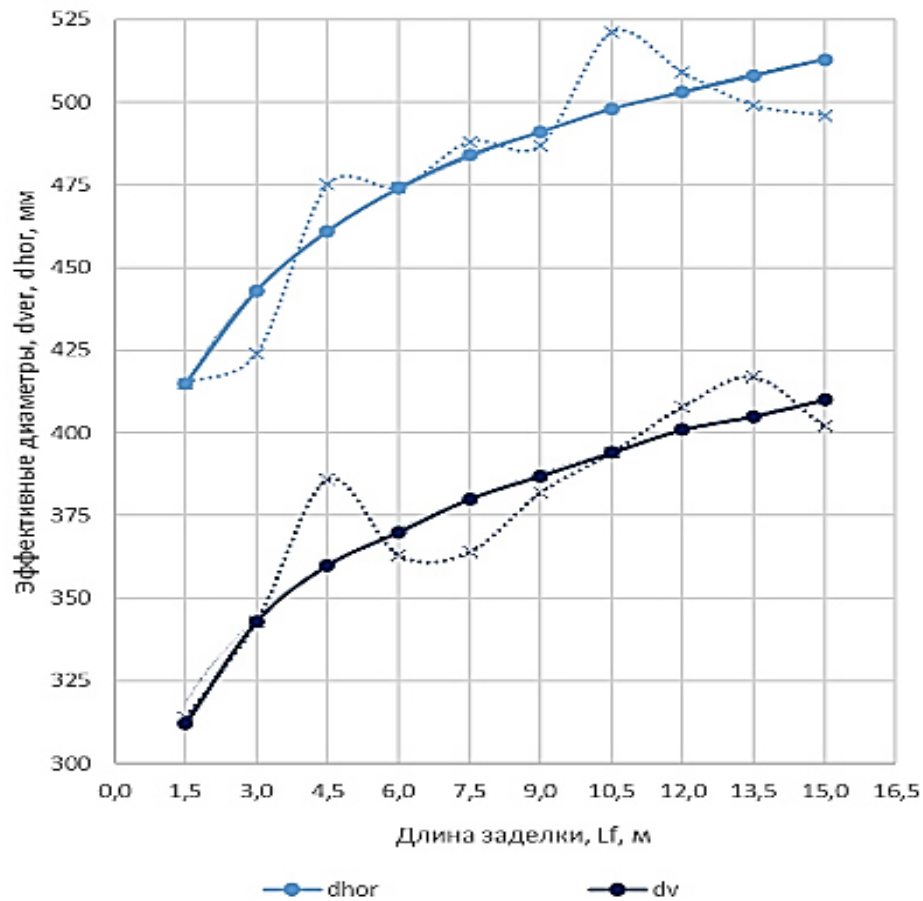


Рис. 8. Эффективные диаметры лобового сопротивления

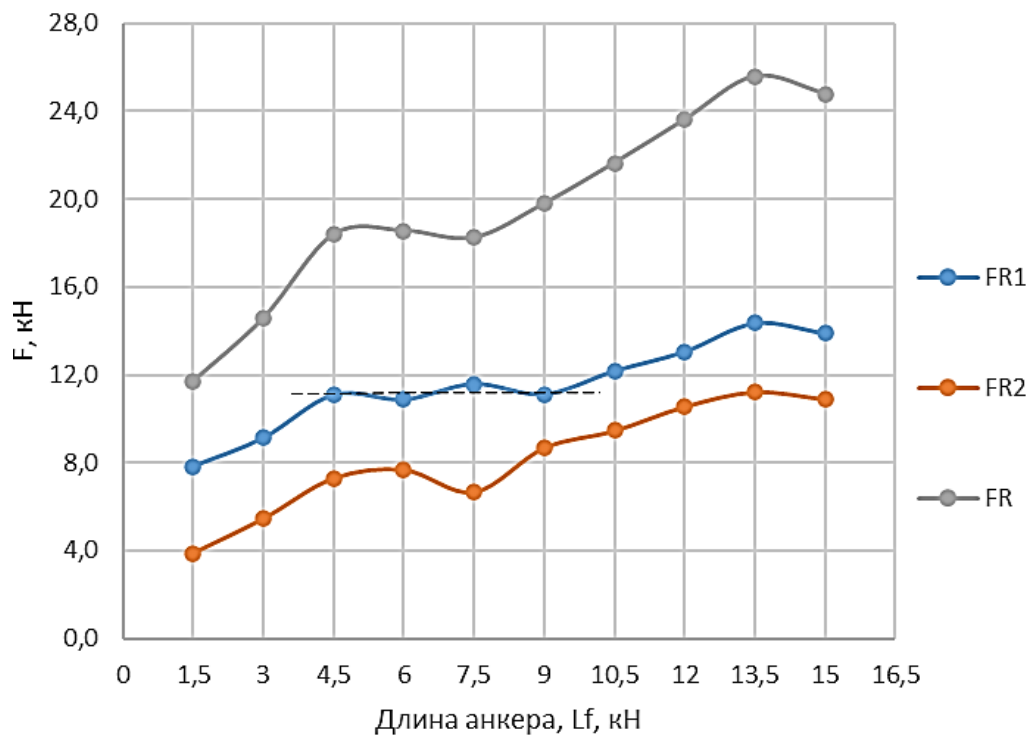


Рис. 9. Результаты расчета лобового сопротивления F_R

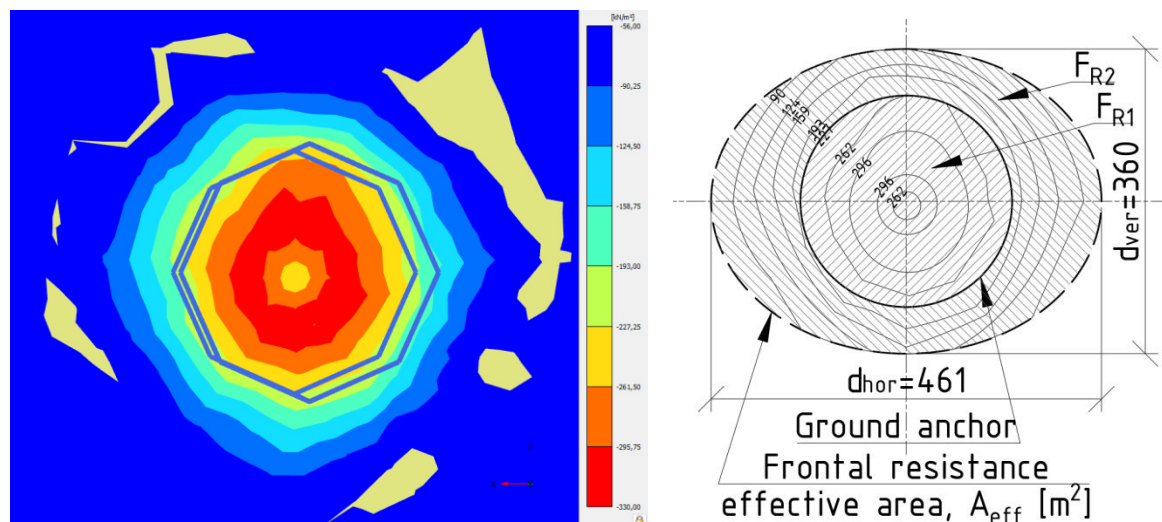


Рис. 10. Схема к расчету лобового сопротивления F_R

Для анкеров с заделкой средней длины ($L_f = 4,5 \dots 9,0$ м) величина F_{R1} приблизительно одинаковая (рис. 9). Анализ образования пластических точек показал, что именно для анкеров средней длины свойственно образование пластических точек при достижении P_{cr} , срыв происходит одновременно по торцу и боковой поверхности.

Для длинных анкеров ($L_f > 9,0$ м) образование пластических точек характерно на стадиях $0,7P_{cr} \dots 0,9P_{cr}$. Для коротких анкеров ($L_f < 4,5$ м) образование пластических точек характерно лишь при потере несущей способности, при $1,1P_{cr}$.

С учетом (4) и (6) величина предельного сопротивления выдергиванию F'_d определяется по формуле:

$$F'_d = \int_0^{L_f} \Delta \tau dA_{ss} + \int_0^{r_f} \Delta \sigma_{hor,g} dA_f + \int_{r_f}^{r_{eff}} \Delta \sigma_{hor,g} dA_{eff} \quad (6)$$

Сравнение предельного сопротивления выдергиванию F'_d по напряжениям со значениями критической силы P_{cr} представлено в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение предельного сопротивления выдергиванию F_q и критической силы P_{cr}

L_f , м	1,5	3	4,5	6	7,5	9	10,5	12	13,5	15
P_{cr} , кН	65	125	180	235	290	345	400	455	510	560
F_q , кН	50,4	103,9	159,6	216,8	275,5	335,4	396,8	459,2	523,0	588,3
F_{R1} , кН	7,8	9,1	11,1	10,9	11,6	11,1	12,2	13,1	14,3	13,9
F_{R2} , кН	3,9	5,5	7,3	7,7	6,7	8,7	9,5	10,6	11,2	10,9
$F_R = F_{R1} + F_{R2}$, кН	11,7	14,6	18,4	18,6	18,2	19,8	21,6	23,6	25,6	24,8
F_R / F'_d , %	18,9	12,3	10,3	7,9	6,2	5,6	5,2	4,9	4,7	4,0
$F'_d = F_R + F_q$, кН	62,1	118,5	177,9	235,4	293,8	355,2	418,4	482,8	548,6	613,1
F'_d / P_{cr} , %	95,5	94,8	98,9	100,2	101,3	103,0	104,6	106,1	107,6	109,5

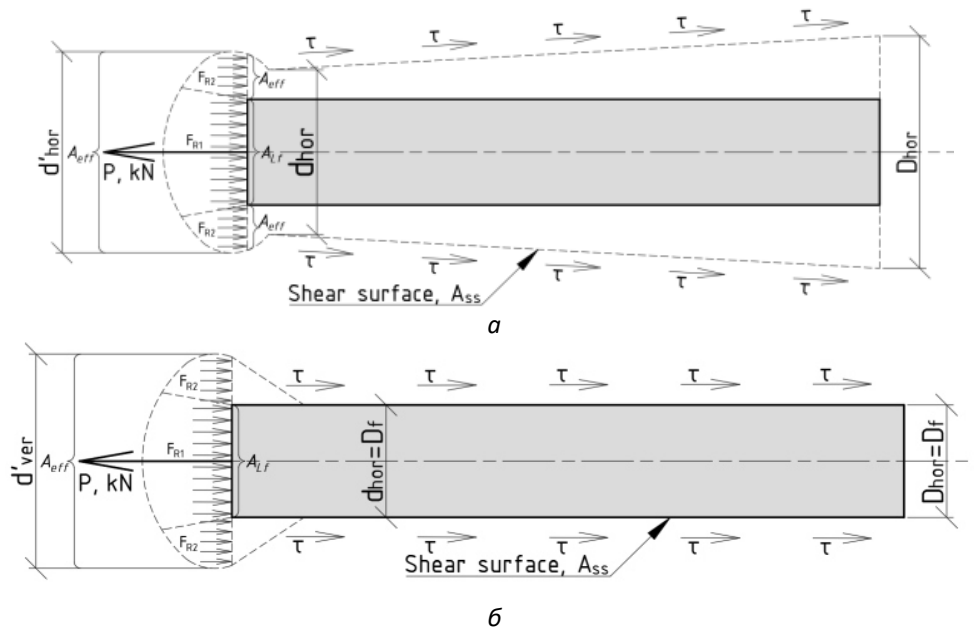


Рис. 11. Напряжения сопротивления анкера выдергиванию

a – в горизонтальной плоскости; *б* – в вертикальной плоскости

По результатам сравнения величин P_{cr} , полученных численным моделированием, и величин F'_d , полученных интегрированием приращений напряжений, получено: разница между этими величинами составляет 5 % – 10 %, что является несущественным при данном подходе. Достаточная сходимость результатов говорит о том, что принятая по результатам анализа напряжений гипотеза о поверхности сдвига в виде усеченного конуса с основаниями в виде эллипсов, а также о наличии эффективной площади лобового сопротивления является верной (рис. 11). Разницу в 5 % – 10 % можно объяснить:

- изменением НДС в грунтовом массиве за поверхностью сдвига;
- изменением НДС, в том числе уплотнением грунта в теле сдвига между поверхностью сдвига и заделкой анкера;
- удлинением заделки анкера;
- незначительным изменением горизонтальных напряжений в грунтовом массиве близ удаленного конца анкера, несмотря на применение элемента *Interface* с $R_{int} = 0,01$;
- упрощением формы поверхности сдвига;
- принятыми расчетными допущениями.

Заключение

Вопрос достоверного определения несущей способности анкера по грунту аналитическими методами остается открытым. Существующие расчетные методики несущей способности заключаются в определении сопротивления выдергиванию по боковой поверхности заделки анкера, а лобовое сопротивление не учитывается.

По результатам исследований получено, что срыв анкера в предельном состоянии происходит по поверхности сдвига, расположенной на некотором расстоянии от заделки, а не по контакту «бетон – грунт». Форма поверхности сдвига, характеризующая сопротивление анкера по боковой поверхности F_q , представляет собой усеченный конус с основаниями в виде эллипсов, развитых в горизонтали.

Качественное различие в характере распределения касательных напряжений связано с большими значениями вертикальных напряжений бытового природного давления по сравнению с боковым давлением. В условиях работы реального анкера это явление также связано с эффектом «налипания» грунта за счет появления уплотненной зоны вокруг анкера (внутри тела сдвига) из-за давления нагнетания при устройстве анкера, при изменении НДС в результате нагружения анкера нагрузкой, а также наличием дилатансии, что в особенности свойственно пескам. В свою очередь уплотнение грунта в теле сдвига ведет к увеличению прочностных и деформационных характеристик грунта, а значит, и к повышению несущей способности.

Определена эффективная площадь отпора A_{eff} , характеризующая лобовое сопротивление анкера F_R . Лобовое сопротивление оказывает влияние на общую несущую способность, которая в таком случае является суммой двух величин: сопротивления анкера по боковой поверхности F_q и лобового сопротивления анкера F_R . Одно из предположений, выдвинутое авторами по результатам исследований, подразумевает образование уплотненной области (ядра) в лобовой части анкера, влияющее на формирование формы тела сдвига. Предполагаемая гипотеза будет проверена в ходе натурных экспериментальных исследований.

Анализ образования пластических точек в торце заделки анкера при нагружении показал, что для анкеров средней длины срыв по торцу анкера и боковой поверхности происходит одновременно. Для длинных анкеров срыв анкера по торцу происходит до достижения предельной нагрузки, то есть сначала анкер срывается по торцу, а затем по боковой поверхности. Для коротких анкеров ситуация обратная – при достижении несущей способности срыв происходит именно по боковой поверхности, а срыв по торцу происходит только при потере несущей способности.

В целом для анкеров с короткой заделкой величина лобового сопротивления составила 10-20% от общей несущей способности, а для анкеров с заделкой средней длины – 6-10%, что дает ощутимый вклад в общую несущую способность. Для анкеров с длинной заделкой учитывать лобовое сопротивление не требуется, поскольку величина бокового сопротивления кратно превышает лобовое, а также ввиду того, что срыв по торцу происходит до достижения предельного состояния.

Список источников

1. Экспериментальные исследования несущей способности анкерных свай и расчетные методы ее определения / Д. Ю. Соловьев, А. И. Харичкин, С. В. Курилло [и др.] // Геотехника. – Том XI. – № 1. – С. 44-54. <https://doi.org/10.25296/2221-5514-2019-11-1-44-54>.
2. Малый, И. М. Расчет несущей способности по грунту и применение микросвай «Титан» для крепления подпорных конструкций / И. М. Малый, А. В. Козлов // Метро и тоннели. – 2011. – № 4. – С. 30-33.
3. Малинин, Д. А. Несущая способность винтовых анкеров «Атлант» / Д. А. Малинин // Жилищное строительство. – 2012. – № 9. – С. 46-49.
4. Barley A.D. Theory and practice of the Single Bore Multiple Anchor system. Anker in Theorie and Praxis. Proc. Int. Symposium Salzburg. Balkema Rotterdam. Oct. 1995. Pp. 293–301.
5. Littlejohn G.S. Design estimation of the ultimate load-holding capacity of ground anchors. Ground Engineering. 1980. No. 13 (8). Pp. 25–39.
6. Hoyt R.M., Chance A., Clemence S.P. Uplift capacity of helical anchors in soil. Proceedings of 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1989. No. 12. Pp. 1019–1022.
7. Tang Ch., Phoon K.-K. Model uncertainty of cylindrical shear method for calculating the uplift capacity of helical anchors in clay. Engineering Geology. 2016. No. 207. Pp. 14–23. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.04.009.
8. Yuan C., Hao D., Chen R., Zhang N. Numerical Investigation of Uplift Failure Mode and Capacity Estimation for Deep Helical Anchors in Sand. Journal of Marine Science and Engineering. 2023. No. 11. 1547. DOI: 10.3390/jmse11081547.

© Афанасьев Н. А., Харичкин А. И., Соловьев Д. Ю., 2026