

## Комбинированные анкерные системы двустороннего действия: теоретические основы, экспериментальная верификация и практическое применение

*И.А. Журикова, Ж.М. Хубиев*

*Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М.Бербекова, Нальчик*

**Аннотация:** В работе теоретически обоснована и экспериментально верифицирована конструкция комбинированного анкера двустороннего действия, объединяющего свайную часть (работа на сжатие) и проволочную с коническим наконечником (работа на выдергивание). Установлено, что несущая способность проволочного анкера превышает аналогичный показатель сваи в 20–25 раз за счет вовлечения в работу конуса грунта. Методом полного факторного эксперимента определено влияние геометрических параметров на выдергивающее усилие. Разработан опорно-анкерный фундамент с изолирующей оболочкой, обеспечивающий работу в режиме переменных нагрузок. Технические решения защищены патентами РФ.

**Ключевые слова:** комбинированный анкер, двустороннее действие, проволочный анкер, свайный элемент, конический наконечник, математическое планирование эксперимента, опорно-анкерный фундамент, изолятор, несущая способность, выдергивающая нагрузка

Современные инженерные сооружения, эксплуатируемые в условиях переменных внешних воздействий (ветровых, сейсмических, температурных деформаций), предъявляют повышенные требования к фундаментным конструкциям, которые должны эффективно воспринимать нагрузки как сжимающего, так и выдергивающего характера. Традиционные свайные фундаменты, несмотря на высокую надежность при передаче вертикальных сжимающих усилий в грунт основания, демонстрируют существенные ограничения в режиме работы на выдергивание. Это обусловлено физико-механическими особенностями взаимодействия цилиндрической поверхности сваи с грунтовым массивом, где реактивное сопротивление формируется преимущественно за счет сил трения по боковой поверхности и собственного веса конструкции [1-3].

Проволочные анкеры с коническими наконечниками, напротив, характеризуются высокой эффективностью при работе на выдергивающие усилия благодаря принципиально иному механизму взаимодействия с

грунтом. При приложении выдергивающей нагрузки вокруг наконечника формируется зона предельного равновесия в виде усеченного конуса, объем которого экспоненциально возрастает с увеличением глубины заглубления [4]. Реактивное сопротивление в этом случае складывается из веса вовлекаемого в работу грунта и сил трения по боковой поверхности конической зоны.

Актуальность настоящего исследования определяется необходимостью синтеза преимуществ обоих типов анкерных систем в единой конструкции, способной работать в режиме двустороннего действия без компромисса по несущей способности в любом направлении нагрузки. Целью работы является теоретическое обоснование, экспериментальная верификация и разработка методики проектирования комбинированных анкерных систем двустороннего действия.

Для свайного анкера при выдергивании уравнение статического равновесия имеет вид:

$$\vec{P}_1 + \vec{G}_1 + \vec{F}_1 = 0, \quad (1)$$

где  $P_1$  – выдергивающая сила, Н;  $G_1$  – собственный вес сваи;  $F_1$  – сила трения по боковой поверхности:

$$F_1 = \pi \cdot d_1 \cdot \sum_{i=1}^n f_i \cdot l_i \quad (2)$$

где  $d_1$  – диаметр сваи, м;  $f_i$  – удельное сопротивление  $i$ -го слоя грунта, кПа;  $l_i$  – длина участка в  $i$ -м слое, м.

Для проволочного анкера с коническим наконечником:

$$\vec{P}_2 + \vec{G}_2 + \vec{F}_2 = 0, \quad (3)$$

где  $G_2 = \gamma \cdot V_k = \gamma \cdot \frac{\pi D^2 L}{12}$  – вес грунтового конуса, Н;  $\gamma$  – удельный вес грунта, кН/м<sup>3</sup>;  $D$  – диаметр основания конуса на поверхности, м;  $L$  – глубина заглабления наконечника, м;  $F_2 = \tau \cdot \pi D_{cp} L$  – сила трения по боковой поверхности конуса, Н;  $\tau$  – удельное сцепление грунта, кПа;  $D_{cp}$  – средний диаметр конуса, м.

Сопоставительный анализ уравнений (1)-(3) показывает, что при одинаковой глубине заглабления отношение несущих способностей:

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{G_2 + F_2}{F_1} \approx 20 - 25, \quad (4)$$

что подтверждает преимущество проволочных анкеров при работе на выдергивание.

#### Методика экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились на лабораторных моделях в песчано-пылеватом грунте плотностью  $\rho=1,65$  г/см<sup>3</sup> и углом внутреннего трения  $\varphi=28^\circ$ . В качестве независимых переменных выбраны три фактора с тремя уровнями варьирования (таблица №1).

Таблица № 1

#### Уровни варьирования факторов

Фактор	Обозначение	-1	0	+1	Интервал
Диаметр сваи и наконечника	$X_1$ , мм	10	20	30	10
Длина свайной части	$X_2$ , мм	10	20	30	10
Расстояние до наконечника	$X_3$ , мм	20	30	40	10

В качестве параметра оптимизации принята сила выдергивания  $P$ , измеряемая динамометром класса точности 0,5. Каждая комбинация уровней факторов испытывалась не менее трех раз для обеспечения статистической достоверности результатов. Обработка экспериментальных данных

выполнена с применением метода наименьших квадратов и дисперсионного анализа [5].

Математическая обработка результатов полного факторного эксперимента позволила получить уравнение множественной регрессии второго порядка в кодированных переменных:

$$P = 82.67 - 2.25X_1 + 2.00X_2 + 20.50X_3 - 5.00X_1X_2 + 93.67X_1X_3 + 13.00X_2X_3 - 56.42X_1^2 - 1.50X_2^2 - 21.67X_3^2, \quad (5)$$

Проверка адекватности модели по критерию Фишера показала, что расчетное значение  $F_{\text{расч}}=3,87$  меньше табличного  $F_{\text{табл}}=4,21$  при уровне значимости  $\alpha=0,05$  и числе степеней свободы  $\nu_1=8$ ,  $\nu_2=6$ , что подтверждает адекватность полученной модели экспериментальным данным.

Пошаговый регрессионный анализ в зоне максимума функции отклика ( $X_1=0,950$ ;  $X_2=0,800$ ;  $X_3=0,750$ ) позволил получить однофакторные модели [8]:

$$P_{\text{max}}^{X_1} = 50.447X_1 + 82.436, \quad (6)$$

$$P_{\text{max}}^{X_2} = 88.468X_2 + 89.862, \quad (7)$$

$$P_{\text{max}}^{X_3} = 112.700X_3 + 31.650, \quad (8)$$

Ранжирование факторов по степени влияния на выдергивающее усилие выполнено на основе частных производных в точке максимума (таблица №2):

Таблица № 2

Ранжирование факторов по степени влияния

Фактор	$X_1$	$X_2$	$X_3$
$\Delta P X_i$	164,872	179,723	63,300
Ранг	2	1	3

Разработанная конструкция опорно-анкерного фундамента (рис. 1) включает:

1. Комбинированные сваи в количестве не менее двух, объединенные в верхней части жестким ростверком;
2. Свайную часть длиной  $h$ , эффективно работающую на сжатие;
3. Проволочную часть с коническим наконечником, заглубленную на дополнительную глубину  $l$ ;
4. Цилиндрическую полость в теле сваи, заполненную высокопрочным композиционным материалом (бетон класса В40), обеспечивающим жесткое сцепление проволоки со сваяй;
5. Изолирующую оболочку длиной  $l$  из полимерного материала на участке проволоки между концом сваи и наконечником.

Наибольшее влияние оказывает длина свайной части ( $X_2$ ), что объясняется ее двойственной ролью: увеличение  $h$  одновременно повышает несущую способность на сжатие (за счет роста площади бокового трения) и на выдергивание (путем увеличения глубины расположения конического наконечника). Диаметр конструкции ( $X_1$ ) занимает второе место по значимости, тогда как расстояние до наконечника ( $X_3$ ) оказывает наименьшее влияние в исследованном диапазоне.

Ключевым инновационным элементом является изолятор, который позволяет:

- Снизить трение при установке анкера;
- Создать предварительное напряжение в проволочной части после монтажа без передачи усилия на свайную часть;
- Обеспечить независимую работу составных элементов при переменных по направлению нагрузках.

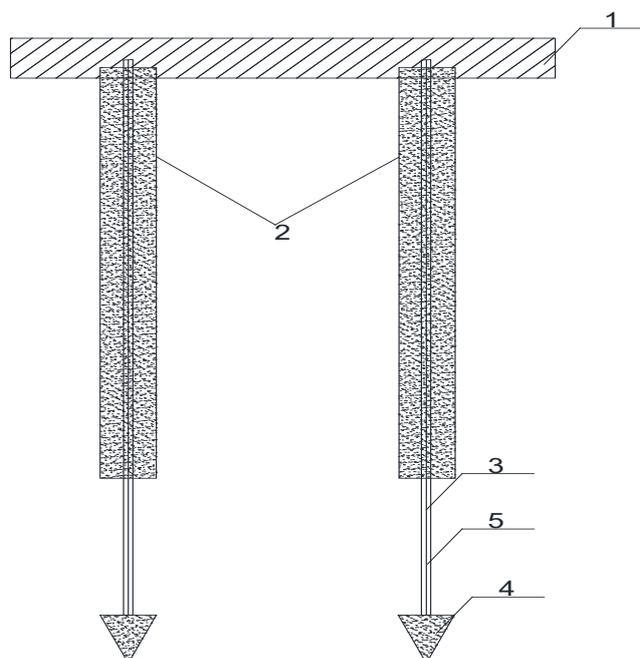


Рисунок 1. Схема опорно-анкерного фундамента: 1 – грунт основания; 2 – свая; 3 – проволока; 4 – конический наконечник; 5 – изолятор.

Пространственная система из трех и более анкеров, расположенных под углом  $120^\circ$  друг к другу, обеспечивает устойчивость к нагрузкам любого направления и повышает устойчивость откосов дамб против оползания в 2,3–2,8 раза по сравнению с традиционными методами укрепления.

**Выводы.** Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что несущая способность проволочного анкера на выдергивание превышает аналогичный показатель сваи в 20–25 раз за счет вовлечения в работу значительного объема грунта в форме конуса.

Разработана математическая модель статического равновесия комбинированного анкера, учитывающая активные и реактивные компоненты силового взаимодействия с грунтовым массивом.

Экспериментальные исследования подтвердили адекватность регрессионной модели второго порядка (проверено по критерию Фишера).

Факторный анализ выявил, что наиболее значимыми параметрами являются длина свайной части ( $X_2$ ) и диаметр конструкции ( $X_1$ ).

Предложена инновационная конструкция опорно-анкерного фундамента с изолирующей оболочкой, обеспечивающая возможность создания предварительного напряжения и эффективную работу в режиме переменных нагрузок [5].

Разработанные технические решения защищены патентами [4,5] и рекомендованы для применения при сейсмическом строительстве, строительстве опор линий электропередачи, укреплении откосов гидротехнических сооружений и создании шпалерных систем в горном садоводстве.

### Литература

1. Ламердонов З.Г., Шуганов А.В., Хаширова Т.Ю. Проволочные анкеры и способы их установки // Природообустройство. 2023. № 4. С. 67–71.
2. Готман А.Л. Свайные фундаменты – эффективно развивающееся направление в фундаментостроении // Основания, фундаменты и механика грунтов, 2020. №3, с. 2-10. ISSN 0038-0741. URL: [ofmg.ru/index.php/ofmg/article/view/6687](http://ofmg.ru/index.php/ofmg/article/view/6687).
3. Тер-Мартirosян З. Г., Аванесов В. С. Взаимодействие анкеров с окружающим грунтом с учетом ползучести и структурной прочности // Вестник МГСУ. 2014. № 10. С. 75-86.
4. Ламердонов З.Г., Хамукова И.А. Комбинированный анкер. Патент на полезную модель № 188078 РФ. Бюллетень изобретений. 2019. № 9. URL: [rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0000188078\\_20190328\\_U1\\_RU](http://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0000188078_20190328_U1_RU)
5. Ламердонов З.Г., Хамукова И.А. Опорно-анкерный фундамент. Патент на полезную модель № 190605 РФ. Бюллетень изобретений. 2019. № 19. URL: [rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0000190605\\_20190704\\_U1\\_RU/](http://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0000190605_20190704_U1_RU/)

6. Бабков В.Ф., Чепурной В.Н. Основы грунтоведения и механики грунтов. М.: Высшая школа, 1985. 368 с.
7. Matsui T., Hong W. P., Ito T. Earth pressure on piles in a row due to lateral soil movements // Soils and Foundations, 1982. V. 22. №2. Pp. 71-81.
8. Apeh J.A., Okoli O.G. Evaluation of ductility index of concrete beams reinforced with rebars milled from scrap metals // Concrete Research Letters. 2016. No. 7(2). P. 56–68.
9. Хаширова Т.Ю. Методические основы статистического планирования эксперимента при проведении неуправляемых натуральных исследований // Природообустройство и рациональное природопользование. М.: МГУП, 2005. Ч. 2. С. 176–181.
10. Чипко С. А., Бурцева О. А. Система компенсации колебаний высотного сооружения в сейсмоактивной зоне // Инженерный вестник Дона, 2014, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/1234](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/1234)
11. Егорочкина И. О., Шляхова Е. А., Черпаков А. В., Соловьев А. Н. Анализ влияния дефектов в основании опоры ЛЭП на параметры собственных поперечных колебаний на основе аналитической модели// Инженерный вестник Дона, 2015. № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/2345](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/2345).

### References

1. Lamerdonov Z.G., Shuganov A.V., Xashirova T.Yu. Prirodoobustrojstvo. 2023. № 4. Pp. 67–71.
2. Gotman A.L. Osnovaniya, fundamenty i mexanika gruntov, 2020. №3, pp. 2-10. ISSN 0038-0741. URL: [ofmg.ru/index.php/ofmg/article/view/6687](http://ofmg.ru/index.php/ofmg/article/view/6687).
3. Lamerdonov Z.G., Xamukova I.A. Kombinirovannyj anker [Combined anchor]. Patent na poleznuyu model` № 188078 RF. Byulleten` izobretenij. 2019. № 9. URL: [rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0000188078\\_20190328\\_U1\\_RU/](http://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0000188078_20190328_U1_RU/)

4. Lamerdonov Z.G., Xamukova I.A. Oporno-ankerny`j fundament [Support and anchor foundation]. Patent na poleznuyu model` № 190605 RF. Byulleten` izobretenij. 2019. № 19. URL: [rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0000190605\\_20190704\\_U1\\_RU/](http://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0000190605_20190704_U1_RU/)
5. Babkov V.F., Chepurnoj V.N. Osnovy` gruntovedeniya i mexaniki gruntov [Fundamentals of soil science and soil mechanics] M.: Vy`sshaya shkola, 1985. P. 368.
6. Matsui T., Hong W. P., Ito T. Soils and Foundations, 1982. V. 22. №2. Pp. 71-81.
7. Ter-Martirosyan, Z. G., Avanesov V. S. Vestnik MGSU. 2014. № 10. Pp. 75-86.
8. Apeh J.A., Okoli O.G. Concrete Research Letters. 2016. No. 7(2). Pp. 56–68.
9. Xashirova T.Yu. Prirodoobustrojstvo i racional`noe prirodopol`zovanie. M.: MGUP, 2005. Ch. 2. Pp. 176–181.
10. Chipko S. A., Burceva O. A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2014, № 1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/1234](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/1234)
11. Egorochkina I. O., Shlyaxova E. A., Cherpakov A. V., Solov`ev A. N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2015, № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/2345](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2015/2345).

**Авторы согласны на обработку и хранение персональных данных.**

**Дата поступления: 7.01.2026**

**Дата публикации: 24.02.2026**