

ЛЕСОЭКСПЛУАТАЦИЯ

УДК 630* 378

А. А. Митрофанов

Митрофанов Александр Александрович родился в 1941 г., окончил в 1964 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водного транспорта леса и гидравлики Архангельского государственного технического университета. Имеет более 150 печатных работ в области теории и организации водного транспорта леса.



К ОПРЕДЕЛЕНИЮ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВИНТОВЫХ ЯКОРЕЙ*

Предложена методика расчета несущей способности винтовых якорей, базирующаяся на классической теории предельного напряженного состояния грунтов и подтвержденная результатами натурных исследований.

винтовые якоря, несущая способность, расчетная зависимость.

Многими поколениями ученых и инженеров-практиков разработано большое количество опор разных конструкций для условий лесосплава. Эти опоры служили, главным образом, для крепления основных лесосплавных гидротехнических сооружений (генеральные запаны и сплотно-формировочные рейды) и представляют собой массивные дорогостоящие объекты с длительным сроком эксплуатации. Применительно к новым технологиям водного транспорта леса требуются принципиально новые рейдовые сооружения – плотостоянки, передерживающие запаны, формировочные и выгрузочные рейды и др., которые отличаются малым объемом переработки древесины, сравнительно небольшими нагрузками и устанавливаются, как правило, на непродолжительное время и часто на отдаленных труднодоступных участках рек.

Для крепления таких сооружений требуются высокоэффективные опоры, надежные в работе и мобильные в установке. Предпочтительно применять русловые опоры, так как установка береговых опор, особенно в отдаленных районах, представляет собой значительные трудности технического и, главным образом, организационного плана, связанные с экологическими проблемами и согласованиями по отчуждению земли. Русловые же опоры могут устанавливаться с мобильных, специально оборудованных транспортных средств без выхода на берег. При этом требуется согласо-

* Работа выполнена по гранту Министерства образования РФ.

ние только с рыбоохранными и судоходными органами. К таким опорам, наряду с разработанными в последнее время в АГТУ [2, 5] новыми якорями складного типа ЯС-15, ЯС-30, ЯС-150, ЯС-170, ЯС-200 и запашного типа ЦЛС-19, безусловно относятся и винтовые якоря конструкции ЦНИИлесосплава [1]. Все они пользуются хорошей репутацией, и с ростом объемов внедрения новых технологий водного транспорта леса спрос на них будет повышаться. В связи с этим вызывает беспокойство точность методики расчета несущей способности винтовых якорей.

По методике [1] несущую способность винтового якоря на действие вертикальной нагрузки (P_v) находят по формуле

$$P_v = \rho_r g H \frac{\pi D^2}{4} + 0,5 \rho_r g \pi D H^2 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) \operatorname{tg} \varphi, \quad (1)$$

где ρ_r – объемная плотность грунта ;

g – ускорение свободного падения;

H – глубина погружения якоря;

D – диаметр якоря;

φ – угол внутреннего трения грунта.

Согласно этой формуле несущая способность анкера определяется массой грунта в призме выпора, объем которой характеризуется коэффициентом пассивного сопротивления грунта $\operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right)$. По законам механики

грунтов [6] такое взаимодействие имеет место при сопротивлении грунта отпору перемещающейся на массив грунта стенки, что, например, имеет место в чистом виде при рассмотрении физической сущности несущей способности анкерно-стенчатых опор. В случае же винтовых и подобных им других, погружаемых в грунт, опор над ними образуется призма выпора грунта, и ее действие по физической природе такое же, как при работе ограничивающих грунт, например берегоукрепительных, стенок. То есть имеет место активное сопротивление грунта, характеризующееся коэффициентом $\operatorname{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right)$.

Отмеченное расхождение в трактовке законов механики грунтов дает при больших φ значительное, практически двойное, завышение объема призмы выпора грунта. В то же время формула (1) не учитывает сцепление в грунте, характеризующееся коэффициентом удельного сцепления c .

По результатам наших исследований для складных якорей [2, 3] построены схемы поверхностей скольжения грунта во второй фазе напряженного состояния в зависимости от глубины заложения, при которой нарушается равновесие грунта и происходит его сдвиг (рис. 1 а, б). Следуя приведенным выше соображениям об активном коэффициенте сопротивления грунта, находим, что прямая $ав$ (рис.1, б) наклонена к вертикали под углом

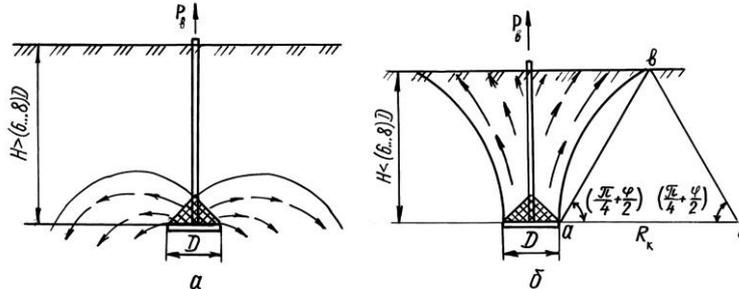


Рис. 1. Схема взаимодействия с грунтом анкера: *a* – глубокого; *б* – неглубокого заложения

$(\pi/4 - \varphi/2)$. Отсюда радиус кривизны R_k , очерчивающий поверхность призмы выпора грунта, определим по выражению

$$R_k = \frac{H}{\sin\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right)}. \quad (2)$$

Применительно к винтовому якорю неглубокого затопления ($H \leq (6 \dots 8)D$) (рис. 1, *б*) его несущую способность при вертикальной нагрузке находим по формуле

$$P_v = \rho_r g V + cS, \quad (3)$$

где $\rho_r g V$ – вес призмы выпора грунта;

cS – сила трения по боковой поверхности призмы выпора;

V – объем призмы выпора грунта;

c – удельное сцепление частиц грунта;

S – площадь боковой поверхности призмы выпора.

Для якоря круглой формы объем V определяем как объем тела вращения:

$$V = \int_0^H F_{\text{п}} dz = \pi \int_0^H (r_k + R_k - \sqrt{R_k^2 - z^2})^2 dz, \quad (4)$$

где $F_{\text{п}}$ – переменная площадь поперечного сечения призмы выпора;

r_k – радиус якоря, $r_k = D/2$.

Решая интеграл (4), получаем

$$V = \pi (r_k^2 H + 2R_k r_k H + 2R_k^2 H - \frac{H^3}{3} - (R_k + r_k)(H\sqrt{R_k^2 - H^2} + R_k^2(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}))). \quad (5)$$

Площадь боковой поверхности призмы выпора определяется как площадь поверхности тела вращения (S):

$$S = 2\pi \int_0^H x(z) \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dz}\right)^2} dz, \quad (6)$$

$$\text{где } x(z) = R_k + r_k - \sqrt{R_k^2 - z^2}. \quad (7)$$

Решаем интеграл (6):

$$S = 2\pi((R_k r_k + R_k^2) \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - R_k H). \quad (8)$$

Таким образом, с учетом зависимости (3) несущая способность якоря (анкера) круглой формы может быть вычислена по выражению

$$P_b = \rho_r g \pi (r_k^2 H + 2R_k r_k H + 2R_k^2 H - \frac{H^3}{3} - (R_k + r_k)(H \sqrt{R_k^2 - H^2} + R_k^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right))) + c 2\pi ((R_k r_k + R_k^2) \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - R_k H). \quad (9)$$

Складные якоря [2] отличаются от винтовых наличием поворотных лап. Формы призм вывора грунта над такими якорями приведены на рис. 2. С учетом этих форм расчетная формула для определения несущей способности складных якорей получена нами [2, 3] в виде

$$P_b = \rho_r g (\pi (r_k^2 H + 2R_k r_k H + 2R_k^2 H - \frac{H^3}{3} - (R_k + r_k) (H \sqrt{R_k^2 - H^2} + R_k^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right))) + n_{\text{л}} \left(\frac{D_{\text{л}}}{2} - r_k\right) (b_{\text{л}} H + 2R_k H - H \sqrt{R_k^2 - H^2} - R_k^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right))) + c(2\pi((R_k r_k + R_k^2) \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - R_k H) + 2n_{\text{л}} R_k \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) \left(\frac{D_{\text{л}}}{2} - r_k\right)), \quad (10)$$

где $n_{\text{л}}$ – число лап якоря;

$\left(\frac{D_{\text{л}}}{2} - r_k\right)$ – длина лап;

$D_{\text{л}}$ – диаметр размаха лап;

$b_{\text{л}}$ – ширина лап;

r_k – радиус конуса якоря.

Полученная зависимость хорошо согласуется с результатами натуральных исследований складных якорей [2] и является универсальной, применимой для всех типов плоских якорей. При $n_{\text{л}} = 0$ она преобразуется в формулу (9), выведенную для определения несущей способности винтовых якорей.

Для сравнения в таблице приведены результаты вычислений несущей способности винтовых якорей разного диаметра по формулам (1) и (9)

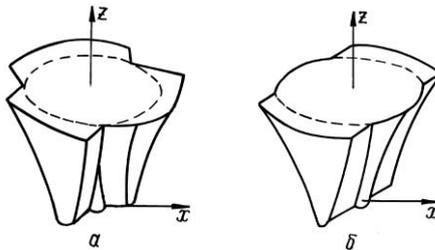


Рис. 2. Призмы вывора грунта над якорями: а – ЯС-15, ЯС-30; б – ЯС-150, ЯС-170, ЯС-200

D, м	H, м	P_v , кН, для песков					
		малой плотности по формуле		средней плотности по формуле		большой плотности по формуле	
		(1)	(9)	(1)	(9)	(1)	(9)
0,2	2,2	25,0	66,5	48,0	84,4	110,6	101,7
0,2	2,5	32,1	89,0	61,8	115,8	142,7	137,2
0,4	2,2	52,0	83,4	98,3	107,2	223,9	124,4
0,4	2,5	66,5	109,4	126,2	139,8	288,4	164,4
0,4	2,7	77,2	129,2	146,8	154,6	335,8	195,7
0,4	4,0	165,8	316,6	318,0	307,3	732,5	484,6

для песков разной плотности: малой ($\rho = 1520 \text{ кг/м}^3$, $\varphi = 24^\circ$, $c = 0,004 \text{ МПа}$), средней ($\rho = 1740 \text{ кг/м}^3$, $\varphi = 30,5^\circ$, $c = 0,005 \text{ МПа}$) и большой ($\rho = 1900 \text{ кг/м}^3$, $\varphi = 40^\circ$, $c = 0,005 \text{ МПа}$).

Анализ приведенных в таблице результатов вычислений показывает, что при $D \leq 0,2 \text{ м}$ формула (1) дает заниженные результаты для всех типов песков, кроме плотных. Для последних результаты близки к полученным по формуле (9).

У якорей больших диаметров, соответствующих по размерам реальным винтовым якорям, результаты вычислений по формуле (1) близки к полученным по формуле (9) для песков средней плотности, в 1,5 с лишним раза занижены для песков малой плотности и на ту же величину завышены для плотных.

Данное обстоятельство объясняется тем, что при больших значениях коэффициента φ (плотные грунты) призма выпора грунта по формуле (1) оказывается значительно завышенной из-за принятой структуры коэффициента сопротивления грунта, а при малых значениях φ , когда знак в выражении этого коэффициента не играет существенной роли, заниженные результаты по формуле (1) объясняются отсутствием учета сил сцепления грунта. Этой же причиной объясняются и заниженные результаты вычислений для якорей малых диаметров, получаемые по формуле (1).

Проведенные в натуральных условиях исследования [2, 4] и выполненный анализ дают основание рекомендовать для расчета несущей способности якорей и анкеров, погружаемых в грунт, формулу (10), как универсальную для всех типов якорей, и формулу (9) для круглых плоских якорей, в том числе винтовых.

Для наклонного и горизонтального приложений нагрузки несущая способность якорей при известном P_v определяется [2] по формуле

$$P_r = P_v e^{(\pi/2 - \alpha) \operatorname{tg} \varphi}, \quad (11)$$

где α – угол наклона бриделя к горизонту.

В заключение нужно отметить, что к применению рассмотренных формул для связных грунтов нужно подходить с большой осторожностью. Наши исследования [2, 7] (более 20 опытов в натуральных условиях) позволили

сделать два вывода. Во-первых, в реальных условиях не встречаются однотипные связные грунты большой мощности (до 3 м и более). Как правило, по глубине грунты разные и располагаются отдельными тонкими слоями. Во-вторых, в опытах не подтверждается явная зависимость несущей способности якорей на таких грунтах от глубины, что имеет место на песчаных грунтах.

Можно отметить только, что несущая способность связных грунтов ниже, чем песков малой плотности. Например, для складного якоря ЯС-15 с площадью проекции его на горизонтальную плоскость 0,0687 м² она равна 70 ... 90 кН. Для сравнения отметим, что несущая способность такого якоря на песках малой плотности составляет в среднем около 90 ... 100 кН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водный транспорт леса: Справочник. – М.: Гослесбумиздат, 1973. – 405 с.
2. Митрофанов А.А. Научное обоснование и разработка экологически безопасного плотового лесосплава. – Архангельск: АГТУ, 1999. – 268 с.
3. Митрофанов А.А., Морозов К.А. Методика расчета анкеров, заглубляемых в грунт // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: Сб. науч. тр. / АГТУ. – Архангельск, 1997. – Вып. 2. – С. 52-58.
4. Митрофанов А.А., Морозов К.А. Экспериментальная проверка расчета несущей способности анкеров и якорей, заглубляемых в грунт // Там же. – С. 59-64.
5. Митрофанов А.А., Суров Г.Я. Плотостоянки. Конструкция, технология, эксплуатация: Учеб. пособие. – Архангельск, 1997. – 113 с.
6. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Высш. шк., 1979. – 272 с.
7. Экспериментальные исследования несущей способности свайных анкеров раскрывающегося типа: Отчет о НИР / АЛТИ; Руководитель А.А. Митрофанов. – № ГР 01.900028475; Инв. № 02.9.10013005. – Архангельск, 1990. – 86 с.

Архангельский государственный технический университет

Поступила 03.04.2000 г.

A.A. Mitrofanov

On Determining the Bearing Capacity of Screw Anchor

The technique for calculating the bearing capacity of screw anchors is suggested based on the classical theory of the ultimate stress state of soils and confirmed by the results of field observations.