

УДК 630*378.7

А. Н. ВИХАРЕВ

Вихарев Александр Николаевич родился в 1961 г., окончил в 1987 г. Архангельский лесотехнический институт, ассистент кафедры водного транспорта леса и гидравлики Архангельского государственного технического университета. Имеет 12 печатных трудов в области экологии водного транспорта леса и оптимизации берегового анкерного крепления.



ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ АНКЕРНЫХ БЕРЕГОВЫХ ОПОР

Разработана математическая модель для определения максимальных параметров береговых анкерных опор из сборного железобетона. Выполнен расчет для песчаных грунтов.

A mathematical model for determining the optimal parameters of precast reinforced concrete shore anchors has been developed. A calculation for sand ground is carried out.

В связи с уменьшением объемов молевого лесосплава возрастает роль транспортировки леса в плотках, судах, а по малым рекам — нетрадиционными средствами. Это требует строительства новых и реконструкции имеющихся стоянок плотов, причалов, других гидротехнических сооружений лесных рейдов [5], а также строительства надежных береговых опор с держащей силой до 400 кН.

В настоящее время на лесосплаве широко распространены деревянные анкерные опоры. Их недостатками являются: уменьшение держащей силы по мере эксплуатации, а следовательно, и короткий срок службы; большой расход высококачественной древесины; для анкерно-стенчатых опор — отчуждение береговой полосы из-за устройства открытых траншей.

В связи с этим необходимо разработать новые конструкции береговых опор, которые должны быть надежны и удобны при эксплуатации, перевозке и монтаже, иметь длительный срок службы и не нарушать природную среду. Анализ [8] показывает, что самыми экономичными являются анкерные железобетонные береговые опоры. Они имеют наибольшую держащую силу, отнесенную к объему опоры. В эксплуатации, перевозке и монтаже удобны опоры из сборного железобетона [7].

На кафедре водного транспорта леса и гидравлики АГТУ разработана конструкция анкерной береговой опоры из сборного железобетона БОС-7. Она состоит из двух железобетонных балок прямоугольного сечения с бандажом посередине. Канат обносится вокруг балок, пропускается между ними и выводится на поверхность грунта [8].

Балки опоры можно серийно изготавливать на заводе железобетонных изделий, а монтаж на месте применения — осуществлять с помощью трелевочного трактора. Опора полностью заглубляется в грунт, а на поверхность выводится только петля, за которую крепится канат от сооружения. Это не нарушает естественного ландшафта, исключает эрозию берегов и отчуждение береговой полосы из естественного землепользования.

Для повышения эффективности опор типа БОС-7 и расширения географии их применения необходимо разработать конструкции, рассчитанные на держащую силу 100, 200, 300, 400 кН, и определить их оптимальные параметры для каждой группы нагрузок при минимальных затратах на изготовление и монтаж. За критерий оптимальности W принят минимизируемый обобщенный критерий в виде взвешенной суммы двух частных: минимизации массы опоры и объема земляных работ при ее монтаже. Из условия, что опора выдерживает расчетную нагрузку,

$$W = c_1 W_1 + c_2 W_2, \quad (1)$$

где W_1, W_2 — критерий минимизации соответственно массы опоры и объема земляных работ;

c_1, c_2 — вес критериев.

Абсолютные значения коэффициентов c_1 и c_2 пропорциональны важности соответствующего частного критерия с учетом требования их нормативности, т. е. $|c_1| + |c_2| = 1$. Значение соответствующего критерия определяют через стоимость производства 1 м³ железобетона и земляных работ.

Если плотность железобетона рассматривать как постоянную величину, то значение W_1 определяется только габаритами опоры (см. рисунок):

$$W_1 = lbh_i \rightarrow \min, \quad (2)$$

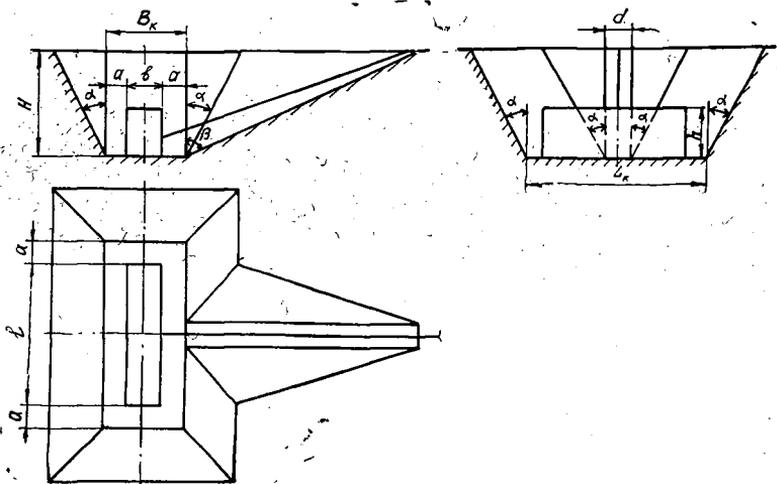
где l, b, h — длина, ширина и высота балки.

Значение W_2 зависит от объема котлована V_k и траншеи $V_{тр}$:

$$W_2 = V_k + V_{тр} \rightarrow \min. \quad (3)$$

Здесь

$$V_k = B_k L_k H + H^3 \operatorname{tg}^2 \alpha + H^2 \operatorname{tg} \alpha (L_k + B_k), \quad (4)$$



где B_k — ширина котлована по дну, $B_k = b + 2a$;
 L_k — длина котлована по дну, $L_k = l + 2a$;
 a — запас на длину и ширину котлована для обеспечения его за-
 чистки и безопасности работ;
 H — глубина заложения опоры;
 α — угол наклона откосов котлована;

$$V_{тр} = \frac{H^3}{3} \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \alpha + \frac{aH^2 \operatorname{tg} \beta}{2}, \quad (5)$$

где d — ширина траншеи;
 β — угол наклона траншеи.

Целевая функция при углах $\alpha = 45 - \varphi/2$, $\beta = 45 + \varphi/2$ при-
 мет вид

$$W = c_1 l b h + c_2 \left[H^3 \left(\operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{1}{3} \right) + H^2 \operatorname{tg} \alpha \left(L_k B_k + \frac{d \operatorname{tg} \beta}{2 \operatorname{tg} \alpha} \right) + B_k L_k H \right], \quad (6)$$

где φ — угол внутреннего трения грунта.

Она имеет переменные l , b , h , H и стремится к нулю при уменьше-
 нии габаритов как опоры, так и котлована. Оптимальные параметры
 опоры необходимо определять при наложении на целевую функцию ряда
 ограничений.

Первую группу составляют ограничения, вызванные требованиями
 к надежности опоры. Максимальный прогиб анкера Y_{\max} не должен пре-
 вышать предельно допустимого $Y_{п.д.}$. Для конструкций из железобетон-
 ных элементов, находящихся под воздействием многократно повторяю-
 щихся нагрузок, $Y_{п.д.}$ принимается равным $l/600$ [4]. Максимальный про-
 гиб анкера как балки, лежащей на упругом основании, определяется по
 формуле [3]

$$Y_{\max} = \frac{1,09P \left(\frac{kh}{4EI} \right)^{0,25}}{2kh}, \quad (7)$$

где P — нагрузка, действующая на опору;

k — коэффициент постели;

E — модуль упругости бетона;

I — момент инерции приведенного сечения железобетонного
 анкера.

При расчете железобетонных конструкций момент инерции приве-
 денного сечения допускается определять относительно центра тяжести
 бетонного сечения [4], если общая площадь арматуры не превышает 2 %
 от площади сечения бетона. В этом случае

$$I = \frac{h(0,5b)^3}{3} + nF_a(0,5b)^2, \quad (8)$$

где n — отношение модуля упругости арматуры E_a к модулю упру-
 гости бетона E ;

F_a — площадь арматуры.

При равномерном расположении арматуры в растянутой и сжатой
 зонах для железобетонных опор средний процент армирования равен
 двум [7]. С учетом формулы (8) получим максимальный прогиб анкера

$$Y_{\max} = \frac{1,09P \left(\frac{6k}{(1 + 0,12n)Eb^3} \right)^{0,25}}{2kh}. \quad (9)$$

Действующая нагрузка на опору P должна быть равна расчетной
 силе P_n , определяемой для несвязных грунтов по формуле [6]:

$$P_n = f \gamma gh [h + 2(H - h)](\lambda_n - \lambda_a) l + \frac{1}{3} \gamma g H^3 \lambda_a \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \varphi, \quad (10)$$

где f — коэффициент, учитывающий распределение реактивного давления грунта;
 γ — плотность грунта;
 g — ускорение свободного падения;
 λ_n, λ_a — коэффициенты пассивного и активного давления грунта.

Ограничения второй группы вызваны требованиями к удобству в эксплуатации и монтаже опоры.

Глубина заложения опоры H не должна быть больше предельной глубины заложения $H_{np} = 2,5$ м. В противном случае резко увеличиваются расходы, связанные с арендой предприятием специальной техники. Возможно также подтопление котлована грунтовыми водами.

Для удобства транспортировки к месту монтажа длина опоры l не должна превышать предельную $l_{np} \leq 7$ м.

В целях сохранения естественного состояния грунта на поверхности и предотвращения выворачивания опоры расстояние от верхней ее кромки до дневной поверхности грунта должно составлять $H - h \geq 1$ м.

Ограничения третьей группы связаны с конечным диапазоном варьирования параметров опоры и дискретностью их задания. В целях типизации элементов их габариты назначают в соответствии с [4]. Высота анкера должна составлять 100, 120, 150, 180, 200, 220, 250 мм (и далее через 50 мм), ширину сечения принимают кратной 50 мм при $b \leq 600$ мм и кратной 100 мм при $b > 600$ мм. Длина анкера равна 2000, 2200, 2500 мм и далее через 500 мм.

Таким образом, задача оптимизации параметров опоры описывается следующей математической моделью:

$$\left. \begin{aligned} W = c_1 l b h + c_2 \left[H^3 \left(\operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{1}{3} \right) + H^2 \operatorname{tg} \alpha (L_k + B_k + \right. \\ \left. + \frac{dH^2 \operatorname{tg} \beta}{2 \operatorname{tg} \alpha} \right) + L_k B_k H \Big]; \\ Y_{\max} \leq Y_{n, \lambda}; \quad P_n = P; \\ H \leq H_{np}; \quad l \leq l_{np}; \quad H - h \geq 1; \\ H \geq 0; \quad l \geq 0; \quad b \geq 0; \quad h \geq 0; \\ l = l_1, l_2, l_3, \dots, l_k; \quad h = h_1, h_2, h_3, \dots, h_n; \\ b = b_1, b_2, b_3, \dots, b_m. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Поскольку мы имеем задачу нелинейного программирования при наличии нелинейных ограничений в виде неравенств, то для нахождения минимума используем метод множителей Лагранжа [2].

Решим сначала задачу при условии, что l, b, h, H непрерывны, а ограничения $l \geq 0, b \geq 0, h \geq 0, H \geq 0, l \leq l_{np}$ не активны, и на первом этапе их не учитываем. Ограничения в виде неравенств можно преобразовать в равенства добавлением к каждому из них неотрицательной ослабляющей переменной u_i^2 , всегда положительной [1]. Задача сводится к минимизации функции при наличии этих ограничений, которые имеют вид:

по прогибу балки

$$u_1^2 + \frac{327 \left(\frac{6k}{(1 + 0.12n) E h^3} \right)^{0.25}}{kh} - l = 0, \quad (12)$$

остальные ограничения

$$u_2^2 - H + h + 1 = 0; \quad (13)$$

$$u_3^2 + H - 2,5 = 0. \quad (14)$$

Для упрощения в формуле (10) обозначим $k_1 = f \gamma g (\lambda_n - \lambda_a)$, $k_2 = \frac{1}{3} \gamma g \lambda_a \operatorname{tg} \beta \operatorname{tg} \varphi$. Тогда

$$k_1 h l (2H - h) + k_2 H^3 - P = 0. \quad (15)$$

Составим функцию Лагранжа:

$$F = c_1 l b h + c_2 \left[H^3 \left(\operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{1}{3} \right) + H^2 \operatorname{tg} \alpha \left(L_k + B_k + \frac{d \operatorname{tg} \beta}{2 \operatorname{tg} \alpha} \right) + L_k B_k H \right] + \\ + \lambda_1 \left(u_1^2 + \frac{327P \left(\frac{6k}{(1 + 0,12n) E b^3} \right)^{0,25}}{k h} - l \right) + \lambda_2 (u_2^2 - H + h + 1) + \\ + \lambda_3 (u_3^2 + H - 2,5) + \lambda_4 [k_1 h l (2H - h) + k_2 H^3 - P], \quad (16)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ — множители Лагранжа.

Необходимым условием экстремума этой функции является равенство нулю частных производных по переменным и множителям Лагранжа (последние должны быть положительны):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial l} &= c_1 b h + c_2 (H^2 \operatorname{tg} \alpha b + B_k H) - \lambda_1 + \lambda_4 [k_1 h (2H - h)] = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial b} &= c_1 l h + c_2 (H^2 \operatorname{tg} \alpha l + L_k H) - \lambda_1 \frac{245P \left(\frac{6k}{(1 + 0,12n) E} \right)^{0,25}}{k h b^{1,75}} = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial h} &= c_1 l b - \lambda_1 \frac{327P \left(\frac{6k}{(1 + 0,12n) E b^3} \right)^{0,25}}{k h^2} + \\ &\quad + \lambda_2 + \lambda_4 [2k_1 l (H - h)] = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial H} &= c_2 \left[3H^2 \left(\operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{1}{3} \right) + 2H \operatorname{tg} \alpha \left(L_k + B_k + \frac{d \operatorname{tg} \beta}{2 \operatorname{tg} \alpha} \right) + L_k B_k \right] - \\ &\quad - \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 (2k_1 h l + 3k_2 H^2) = 0; \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial \lambda_1} &= u_1^2 + \frac{327P \left(\frac{6k}{(1 + 0,12n) E b^3} \right)^{0,25}}{k h} - l = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda_2} &= u_2^2 - H + h + 1 = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial \lambda_3} = u_3^2 + H - 2,5 = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda_4} &= k_1 h l (2H - h) + k_2 H^3 - P = 0; \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\frac{\partial F}{\partial u_1} = 2\lambda_1 u_1 = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial u_2} = 2\lambda_2 u_2 = 0; \quad \frac{\partial F}{\partial u_3} = 2\lambda_3 u_3 = 0. \quad (19)$$

Умножим уравнения (19) на $u_i/2$, выразим u_i^2 из (18) и подставим в (19):

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F}{\partial u_1} &= \lambda_1 \left(l - \frac{327P \left(\frac{6k}{(1 + 0,12n) E b^3} \right)^{0,25}}{k h} \right) = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial u_2} &= \lambda_2 (H - h - 1) = 0; \\ \frac{\partial F}{\partial u_3} &= \lambda_3 (2,5 - H) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Для совместного решения системы уравнений (17), (18), (20) используется ЭВМ и математический пакет «Эврика».

Ниже приведены результаты расчетов при нагрузках 100, 200, 300, 400 кН для песчаных грунтов и следующих исходных данных: $c_1 = 0,96$; $c_2 = 0,04$; $\gamma = 1700$ кг/м³; $\varphi = 30^\circ$; $k = 3 \cdot 10^7$ Н/м³; $E_a = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па; $E = 2,1 \cdot 10^{10}$ Па; $a = 0,25$; $d = 0,7$.

Так, для опоры на нагрузку 300 кН с коэффициентом запаса 1,75 получено $l = 5,17$ м; $b = 0,11$ м; $h = 1,50$ м; $H = 2,50$ м; $\lambda_1 = 0,22$; $\lambda_2 = 0,88$; $\lambda_3 = 0$; $x_4 = 3,21 \cdot 10^{-6}$; $u_1 = 0$; $u_2 = 0$; $u_3 = 0,002$.

Анализ решения показывает, что все ограничения математической модели выполняются, следовательно, принятые нами допущения правы.

Для определения стандартных габаритов опоры применяем комбинаторный подход. Он состоит в том, чтобы для каждой приемлемой комбинации значений габаритов опоры в окрестностях полученных значений найти минимум целевой функции (6) по остальным переменным и из полученных величин выбрать наименьшую. В этом случае задача существенно сужается. Например, для опоры на нагрузку 300 кН можно принять длину опоры 5,5 м, так как при этом соблюдаются все ограничения. Затем находят стандартную высоту опоры, толщину и глубину заложения. Полученные результаты оптимальных параметров опоры для песчаных грунтов приведены в таблице.

Показатели	Оптимальные параметры опор при расчетной нагрузке, кН			
	100	200	300	400
Глубина заложения опоры, м	2,32	2,49	2,49	2,50
Габариты опоры, м:				
длина	2,00	3,50	5,50	7,00
высота	1,20	1,20	1,30	1,50
толщина	0,20	0,25	0,30	0,30

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс / Пер. с англ.—М.: Радио и связь, 1966.—128 с. [2]. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация / Пер. с англ.—М.: Мир, 1965.—509 с. [3]. Митинский А. Н. Балки постоянного сечения на упругом основании.—Л.: Типо-литогр. ЛТА, 1940.—88 с. [4]. СНиП 2.03.01—84. Бетонные и железобетонные конструкции: Утв. Гос. ком. СССР по делам стр-ва 20.08.84.—М.: Стройиздат, 1985.—79 с. [5]. Соколов К. Б. Водный транспорт леса в новых экономических условиях // Лесн. пром-сть.—1994.—№ 2.—С. 6—7. [6]. Справочник по водному транспорту леса / В. А. Щербаков, Ю. П. Борисовец, В. Д. Александров и др.—М.: Лесн. пром-сть, 1986.—384 с. [7]. Таскаев В. Г. Береговые опоры лесосплава: Учеб. пособие.—Архангельск: РИО АЛТИ, 1991.—65 с. [8]. Таскаев В. Г., Вихарев А. Н. Анкерная опора из сборного железобетона // Лесн. пром-сть.—1992.—№ 6.—С. 16. [9]. ТП 411—01—110.83. Типовые проектные решения наплавных сооружений и опор для сплавных рек и лесных рейдов / Гипролестранс.—Л., 1983.—215 с.

Поступила 8 июня 1994 г.