

УДК 624.154

В.П. Чернюк, А.В. Бондарь, Е.И. Шляхова

Брестский государственный технический университет
г. Брест, Республика Беларусь

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВИНТОВЫХ ЛОПАСТЕЙ СВАЙ И АНКЕРОВ В ИХ РЕЖУЩИХ И ХВОСТОВЫХ ЧАСТЯХ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Аннотация. Расчеты винтовых лопастей свай и анкеров в центральных и режущих (хвостовых, передних, задних) частях отличаются между собой в силу особенностей их работы в основании. В первом случае они работают как сплошные (неразрезные) пластины переменной толщины, во втором – как разрезные. Жесткость и прочность лопастей винтовых свай в этих сечениях разная. По этой причине режущие и хвостовые части винтовых лопастей более загружены и нуждаются в усилении и должны выполняться более толстыми. В центральных сечениях – наоборот. В настоящей статье предлагается методика расчета винтовых лопастей и свай и анкера в их режущих и хвостовых частях.

Ключевые слова: винтовая лопасть, центральные, режущие и хвостовые сечения, методы расчета, прочность винтовой лопасти, толщина сечения, усиление.

Винтовые лопасти анкерных свай и анкеров, в отличие от круглых пластин переменной толщины в виде круглых фундаментных плит, турбинных дисков, лопастей гидромашин, клапанов, задвижек и т.п., имеют свои особенности расчета и проектирования в силу конструктивного исполнения по двум причинам.

Эти отличия заключаются в том, что винтовая лопасть, во-первых, представляет собой разрезную (незамкнутую) винтовую пластинку-оболочку, защемленную в стволе сваи и работающую совместно с основанием. Во-вторых, в отличие от сплошных (неразрезных) круглых пластин постоянной или переменной толщины, винтовая лопасть является конструкцией пространственной, т.к. след лопасти на ступице составляет 1,0...1,25 шага и больше, а в плане она имеет 1,0...1,25 оборота. Винтовая

лопасть, имеющая радиальные разрезы в режущей (передней) и хвостовой (задней) частях пластины, разведена в разные стороны вдоль ствола сваи, имеет пространственную конструкцию.

Жесткость и прочность такой пространственной конструкции в центральных частях лопасти (между режущей и хвостовой частями) несколько выше жесткости и прочности плоской разрезной пластины, но в самих режущих и хвостовых частях-значительно ниже прочности и жесткости (чем в центральных частях), что обуславливается возможностью работы передней и задней частей лопасти на изгиб.

Подробный расчет и проектирование винтовых лопастей свай и анкеров в центральных частях (как круглых пластин переменной толщины) изложен и приведен в [1]. Однако данный способ для расчета прочности и жесткости в режущих и хвостовых частях винтовых лопастей неприемлем из-за другой схемы их работы в основании.

По этой причине и в связи с тем, что расчет прочности незамкнутой, т.е. разрезной пластины-оболочки в передней и хвостовой частях, защемленных в стволе сваи и работающих совместно с основанием, аналитическими и численными методами реализовать сложно, трудоемко и даже, невозможно, необходимо принятие некоторых допущений. Так как угол подъема срединной (центральной) поверхности лопастей существующих винтовых свай и анкеров незначителен и изменяется в пределах $9 \dots 20^\circ$, то расчетную схему пространственной винтовой лопасти вполне допустимо принять в виде кольцевой пластины, имеющей, в отличие от известных расчетных схем, разрез в радиальном направлении, т.е. винтовую лопасть, конструкцию-пространственную, имеющую радиальный разрез, можно рассматривать в центральных сечениях с достаточной степенью приближения, как разрезную плоскую кольцевую пластину-оболочку постоянной или переменной толщины. Игнорирование пространственной работы лопасти, а также уменьшение ее площади, по сравнению с реальной изогнутой винтовой пластиной-оболочкой, будет идти в запас прочности.

Таким образом, расчетная схема винтовой лопасти принимается в виде защемленной по внутреннему контуру кольцевой пластины с углом охвата 2π (рис. 1), нагруженной равномерно, распределенной нагрузкой q от действия внешних сил. При $\varphi = 0$ и $\varphi = 2\pi$ кольцевая пластина имеет свободные (разрезные) края, что соответствует радиальному разрезу лопасти. При таком подходе расчеты прочности и толщин s винтовых лопастей в центральных радиальных сечениях лопасти (разрез А-А на рис. 1) допустимо вычислять как для замкнутых (сплошных) круглых пластин переменной толщины [1].

В передней (режущей) и задней (хвостовой) частях (разрез Б-Б на рис. 1) данный подход не применим и фактически невозможен предыдущим методом из-за наличия свободных краев винтовой лопасти, работающих на изгиб, и требуется иной способ для расчета толщины разрезных краев пластины-оболочки постоянной или переменной кривизны в этих местах. По этой причине напряжено-деформированное состояние винтовых лопастей в

этих частях было целесообразно было определять методом конечных элементов, для чего применялся расчетно-вычислительный комплекс “Лира”, разработанный в НИИАСС Госстроя Украины [2].

Для описания расчетной схемы использовались треугольные конечные элементы тонких пластинок со следующими степенями свободы в каждом узле: W , $\frac{\partial w}{\partial x_1}$ и $\frac{\partial w}{\partial y_1}$, т.е в узлах налагались связи на вертикальные перемещения W из плоскости и углы поворота $\frac{\partial w}{\partial x_1}$ и $\frac{\partial w}{\partial y_1}$ по направлениям местной системы координат.

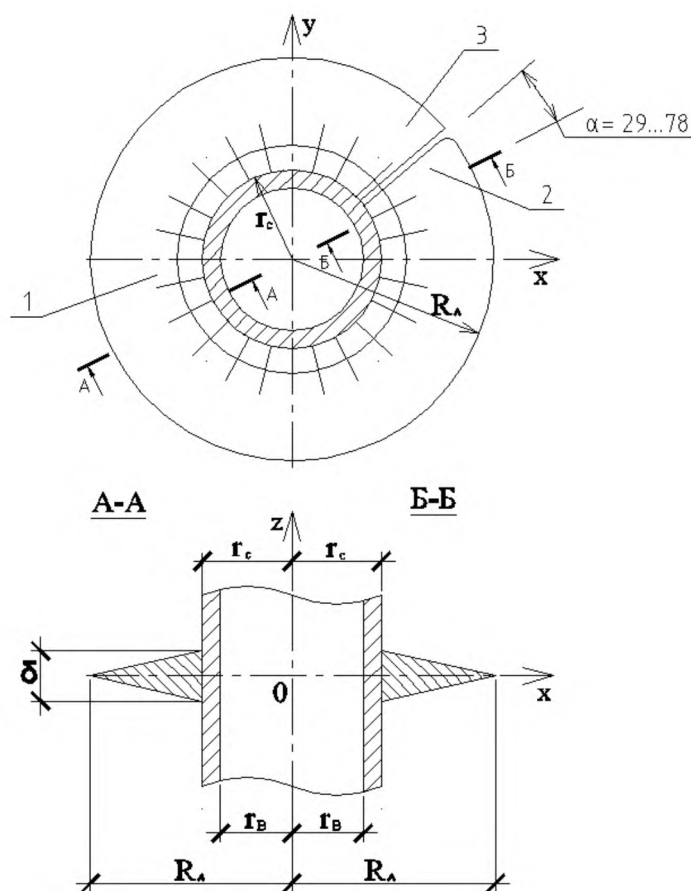


Рисунок 1. Схема к расчету лопастей винтовых свай и анкеров в центральной (1), режущей передней (2), и хвостовой задней (3) частях

Размеры конечных элементов принимались достаточно малыми, а сечение лопасти в радиальном направлении изменялось ступенчато с размерами, эквивалентными сечению клина в центре тяжести соответствующей трапеции с прямолинейными и криволинейными боковыми гранями. Таким образом, сечение лопасти в радиальном направлении рассматривалось в форме клина с толщиной убывающего профиля от заземления в стволе к периферии. Исследования выполнялись для расчетных схем винтовых лопастей с соотношениями: $(R_A - r_c) / \delta = 6...16$, $R_A / r_c = 3..5$ где R_A - радиус винтовой лопасти; r_c - радиус ствола свай, δ -толщина лопасти в заземлении, что позволило рассматривать их как тонкие пластины-оболочки. Ма-

териал лопасти считался изотропным и однородным, а коэффициент Пуассона μ изменялся в пределах $\mu = 0,25 \dots 0,33$ (в исследованиях [3] показано, что изменение коэффициента μ в указанных пределах, а это зависит от материала лопасти, на прочность винтовой лопасти существенного влияния не оказывает). Из-за больших объемов вычислений расчеты вычислялись на ЭВМ.

В процессе исследований была осуществлена оценка влияния дискретности расчетной схемы замкнутых кольцевых пластин и пластин с разрезом постоянного и переменного сечений на величины изгибающих моментов. Для этого сопоставлялись расчеты, выполненные методом конечных элементов с результатами, полученными по классической теории пластин [4]. Таким образом, были установлены критерии подобия и внесены соответствующие поправки в конечные результаты расчетов.

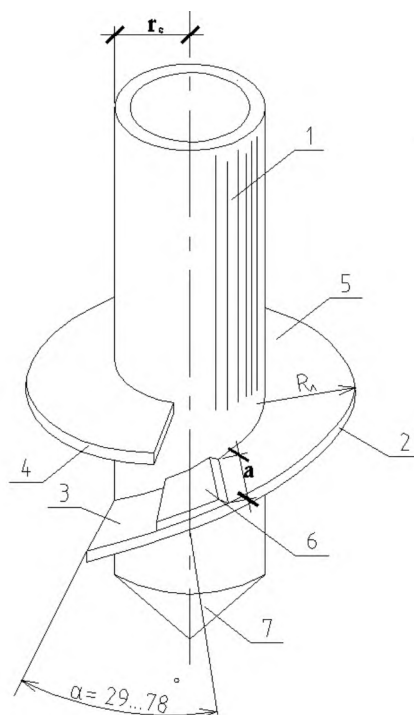


Рисунок 2. Винтовая свая с усилением передней (режущей) части лопасти:

1-ствол; 2-винтовая лопасть; 3-заходная (режущая) часть; 4-задняя (хвостовая) часть; 5-центральная часть лопасти; 6-накладка (утолщение); 7-конический наконечник

При анализе напряжённо-деформированного состояния было установлено, что прочность винтовой лопасти и ее несущая способность зависят от величин изгибающих моментов M_r , возникающих в ней; при этом максимальные значения изгибающих моментов принимаются в зоне заделки винтовой лопасти в стволе, в заходном и хвостовом её сечениях, в радиальном направлении, на некотором удалении от разреза (при значении угла смещения $\alpha = 29 \dots 78^\circ$ от разреза).

На этом основании авторами было предложено техническое решение винтовой сваи, защищенное а.с. СССР №1534140, согласно которому заходные (режущие) и хвостовые (задние) части винтовых лопастей следует усиливать путем увеличения толщины сечения или приварки накладок

(рис. 2), что подтверждает справедливость расчетных положений и формул. При этом вылет накладки а относительно ствола должен быть более 1/20 вылета лопасти.

Имея результаты расчета для пластин с разными соотношениями и абсолютными значениями R_Λ , r_c , δ после внесения поправок были получены расчетные значения максимальных величин изгибающих моментов $M_r^{\max}$ зависящих от характера изменения толщин пластины (кривизны), соотношения радиусов ствола и лопасти при значениях коэффициента Пуассона $\mu = 0,25 \dots 0,33$.

В результате максимальные значения изгибающих моментов можно определять по следующим расчетным формулам в кНм:

– для лопастей постоянной толщины:

$$M_r^{\max} = (12,94 - 23,72 \frac{r_c}{R_\Lambda}) q \frac{R_\Lambda^2}{6} \quad (1)$$

– для лопастей переменной толщины:

$$M_r^{\max} = (14,8 - 26 \frac{r_c}{R_\Lambda}) q \frac{R_\Lambda^2}{6} \quad (2)$$

где q – интенсивность действия внешней нагрузки, кПа;

R_Λ и r_c – соответственно радиусы лопастей и ствола свай, м.

В связи с тем, что значения $M_r^{\max}$ определяется для заходного и хвостового сечений лопасти в зоне заделки их стволом на незначительном удалении от радиального разреза ($29 \dots 70^\circ$), то толщина лопасти в этих сечениях $\delta = t_{\max}$ и определяется по формуле (3), а других цилиндрических сечениях толщина лопасти убывающего переменного (гиперболического) профиля t_r : определяется по выражению (4):

$$t_{\max} = \sqrt{\frac{6 \cdot M_{\max}}{\gamma_c \cdot R_u}}; \quad (3)$$

$$t_r = t_{\max} \left[1 - \left(\frac{r - r_c}{R_\Lambda - r_c} \right)^Z \right], \quad (4)$$

где : $t_{\max}$ – максимальное значение толщин винтовой лопасти в зоне ее заделки в стволе свай, м;

γ_c – коэффициент условий работы лопасти, дол. ед.;

R_u – предельно допустимые изгибающие напряжения на растяжение либо сжатие (для равнопрочных сжатию и растяжению материалов) или растяжение и сжатие (для неравнопрочных растяжению и сжатию материалов), кПа;

$0 \leq Z \leq 1$ – показатель степени вогнутости лопасти (при $Z = 1$ профиль лопасти линейный), принимается в каждом случае, исходя из существующего, требуемого или проектируемого профиля винтовой лопасти, максимально к нему приближаясь.

Для наглядности и с целью сравнения результатов вычислений, полученных различными методами, рассмотрим конкретный пример расчета лопасти в трех сечениях существующей винтовой анкерной сваи СВ 30/105, работающей на выдергивание, при следующих исходных данных [1]:

Материал лопасти-высокопрочный чугун марки ВЧ-50-1,5 с $R_u = 2,7 \cdot 10^5 \text{ кПа}$; $E = 2 \cdot 10^8 \text{ кПа}$, $\mu = 0,25$. Радиус ствола сваи $r_c = 15,55 \text{ см}$ при толщине лопасти в зоне заделки $\delta = 6 \text{ см} + 1,5 \text{ см}$ на скругление; радиус винтовой лопасти $R_\Lambda = 52,5 \text{ см}$ при $\delta = 1,75 \text{ см}$; средний радиус винтовой лопасти

$$r_{cp} = \frac{15,55 + 52,5}{2} = 34 \text{ см}, \text{ при } \delta = 2,65 \text{ см} \text{ расчетная выдергивающая нагрузка}$$

$$P = 600 \text{ кН}. \quad \text{Интенсивность} \quad \text{действия} \quad \text{нагрузки}$$

$$q = \frac{P}{\pi(K_\lambda^2 - r_c^2)} = \frac{600}{3,14(0,525^2 - 0,155^2)} = 760 \text{ кПа}.$$

Решение

Исходя из существующего профиля лопасти винтовой сваи СВ 30/105 подбираем наиболее близкое (гиперболическое) очертание профиля винтовой лопасти, так чтобы обеспечилось бы наиболее близкое совпадение толщин лопастей существующей и расчетной винтовых свай. Оно будет равно при

$$t = Hr^k = 0,0093r^{-1} (H = 0,093, k = -1) \text{ При этом:}$$

$$\text{при } r = r_c = 0,1555 \text{ м; } t_{rc} = \frac{0,093}{0,1555} = 0,0598 \text{ м при } \delta = 0,06 \text{ м;}$$

$$\text{при } r = R_\Lambda = 0,525 \text{ м; } t_{r\Lambda} = \frac{0,093}{0,525} = 0,0177 \text{ м при } \delta = 0,0175 \text{ м;}$$

$$\text{при } r = r_{cp} = 0,34 \text{ м; } t_{rcp} = \frac{0,093}{0,34} = 0,0274 \text{ м при } \delta = 0,0265 \text{ м;}$$

Для всех трех расчетных сечений от центра сваи определим значения изгибающих моментов M_r в центральных частях лопасти, рассчитываемых аналитическим методом, как для круглых пластин переменной толщины [1]. Из-за длительности вычислений значения M_r позаимствуем из [5] при тех же исходных данных. Они будут соответственно равны:

$$M_r = 98,287 \text{ кН} \cdot \text{м}; M_{r\Lambda} = 0 \text{ кН} \cdot \text{м}; M_{rcp} = 10,8542 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Для всех трех расчетных центральных сечений толщины винтовой лопасти можно рассчитать по формуле (3):

$$t_{rc} = t_{\max} = \sqrt{\frac{6 \cdot 98,287}{1 \cdot 2,7 \cdot 10^5}} = 0,0467 \text{ м}; \quad t_{r\Lambda} = \sqrt{\frac{6 \cdot 0}{1 \cdot 2,7 \cdot 10^5}} = 0 \text{ м}; \quad r_{cp} = \sqrt{\frac{6 \cdot 10,8542}{1 \cdot 2,7 \cdot 10^5}} = 0,01555 \text{ м}.$$

Для расчета толщин в передней режущей и хвостовой частях винтовой лопасти воспользуемся методом конечных элементов. По формуле (2) для лопастей переменной толщины вначале определим значение $M_r^{\max}$, а затем по выражениям (3),(4) – сами значения толщин в трех расчетных сечениях (при средней степени вогнутости лопасти $Z=0,5$).

$M_{rc}^{\max} = (14,8 - 2,6 \frac{0,1555}{0,525}) 760 \cdot 0,525^2 / 6 = 248 \text{ кНм}$; т.е. примерно в 2,5 раза больше, чем в центральных сечениях в зоне заделки со стволом, (точнее в $\frac{248}{98,287} = 2,52$ раза);

$$t_{rc} = t_{\max} = \sqrt{\frac{6 \cdot 248}{1 \cdot 2,7 \cdot 10^5}} = 0,00742 \text{ м};$$

$$t_{r\Lambda} = 0,742 \left[1 - \frac{(0,525 - 0,1555)^{0,5}}{(0,525 - 0,1555)} \right] = 0 \text{ м};$$

$$t_{rcp} = 0,742 \left[1 - \frac{(0,34 - 0,1555)^{0,5}}{(0,525 - 0,1555)} \right] = 0,223 \text{ м},$$

Для наглядности и дальнейшего анализа все результаты вычислений толщин в трех сечениях лопасти ($t_{rc}, t_{rcp}, t_{r\Lambda}$) сведем в табл. 1 и по ней построим четыре графика профилей винтовой лопасти-фактический (а), теоретический (б), расчетный (аналитический) для центральных частей лопасти (в) и расчетный для режущей (хвостовой) частей лопасти (рис.3). По вертикальной оси t масштаб толщины лопасти принять 1:1, по горизонтальной r -1:3.

Таблица 1.

Расчетные и фактические значения толщин лопасти винтовой сваи СВ 30/105
в трёх сечениях

Толщина лопасти винтовой сваи	Значение толщины винтовой лопасти сваи при радиусе r , см		
	$r_c=15,555$	$r_{cp}=34$	$R_{\Lambda}=52,5$
Фактическая (существующая)	6 ^{11,5}	2,65	1,75
Теоретическая (приведенная)	5,98	2,74	1,77
Расчетная в центральной части, полученная аналитическим путем	4,67	1,55	0
Расчетная в режущей (заходной) и задней (хвостовой) частях, полученная методом конечных элементов	7,42	2,23	0

Примечание: 6+1,5-фактическая толщина лопасти со скруглением на стволе (из них 6см фактическая толщина лопасти, 1,5 см-скругление)

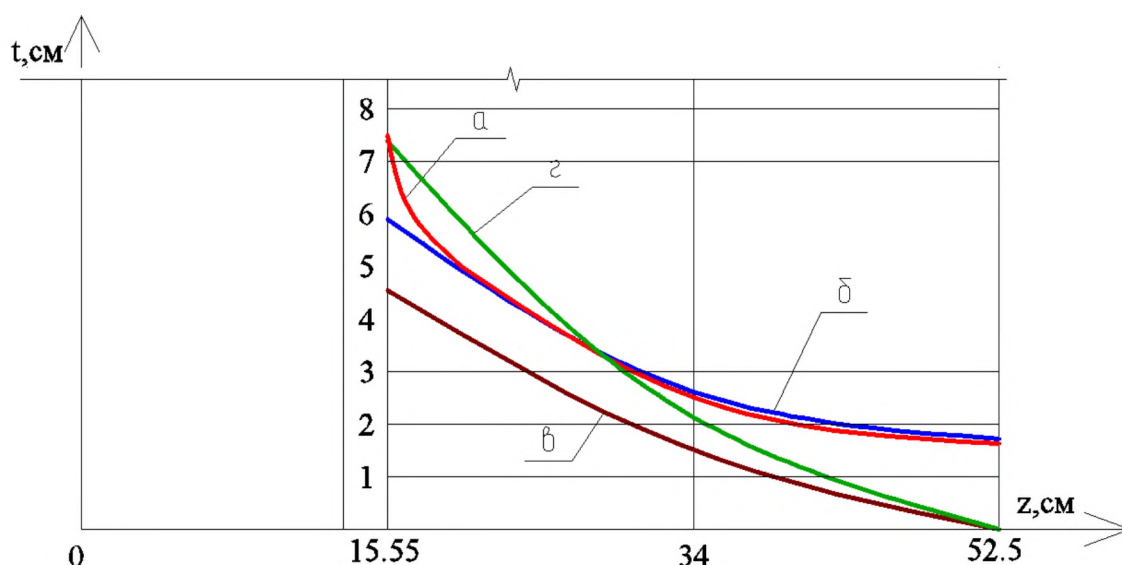


Рисунок 3. Фактический (а), приведенный (б), расчетный в центральной части (в) и расчетный в заходной (хвостовой) части (г) профили лопасти винтовой сваи

Вывод. Приведенные в таблице 1 данные и изображение на рис.3,3 кривые показывают, что во всех трех расчетных сечениях фактические (приведенные) толщины профиля винтовой части сваи СВ 30/105 превышают расчетные в тех же сечениях лопасти на выдергивающую нагрузку $P=600$ кН, что идет в запас прочности и защиту от коррозии. При этом расчетные значения в режущей и хвостовой частях лопасти превышают её толщину в центральных частях, поэтому требуется утолщение винтовой лопасти в передней и задней частях при действии на сваю больших по величине выдергивающих нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернюк, В.П. Расчет и проектирование винтовых лопастей свай и анкеров как круглых пластин переменной толщины /В.П. Чернюк, П.П.Ивасюк, В.П. Щербач// Материалы международной научно-практической конференции “Современные технологии в строительстве, теплогазоснабжении и энергосбережении”. – РФ, г.Саратов, ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ им Н.И. Вавилова, 2015.-С.237-245.
2. Мухин, А.В. К расчету и конструированию лопасти винтовой сваи/А.В. Мухин, В.П. Чернюк, В.Н. Пчелин, В.В. Спиридонов // Брестский инж.-строй. ин-т.-Брест, 1998.-8с.-Деп.во ВНИИИС 27.01.88, №8544, МФ НPSUOO8544СА.
3. Богород, Л.Я. Винтовые сваи и анкеры в электросетевом строительстве/ Л.Я.Богород // -М.:Энергия, 1967.-200с.
4. Тимошенко, С.П. Пластины и оболочки. /С.П. Тимошенко, С.Войковский-Кригер//.-М.:Наука, 1966-635с.
5. Чернюк, В.П. Расчет, проектирование и устройство свайных фундаментов / В.П. Чернюк, П.С. Пойта // -Брест, Облтипография, 1998.-212с.