

4. Береснев, А.С. О распределении заданного нагружения между плитой и сваями в плитно-свайном фундаменте / А.С. Береснев, А.Ю. Большаков, Г.Н. Гусев, В.В. Коркодинов, Б.Н. Пименов // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2008. – Volume 4, Issue 2. – P. 33.
5. Оржеховский, Ю.Р. Экспериментальное исследование плитно-свайного фундамента / Ю.Р. Оржеховский, В.В. Лушников, А.С. Ярдаков // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. Строительные науки. – 2009. – Вып. 1. – С. 71–73.
6. Мирсяпов, И.Т. Моделирование напряженно-деформированного состояния плитно-свайного фундамента при совместном деформировании с окружающим грунтовым массивом / И.Т. Мирсяпов, Д.А. Артемьев // Вестник гражданских университетов. – С-Петербург, 2009. – № 2. – С. 121–124.
7. Мангушев, Р.А. Плитно-свайный фундамент для здания повышенной этажности / Р.А. Мангушев, А.Б. Фадеев // Основания, фундаменты и механика грунтов. М., 2008. – № 1. – С. 15–19.
8. Гусев, Г.Н. Численное моделирование силового взаимодействия плитно-свайного фундамента с грунтовым массивом / Г.Н. Гусев, А.А. Ташкинов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т. 5, № 3. – С. 359–363.
9. Бартоломей, Л.А. повышение эффективности способов проектирования массивных плитных и свайных фундаментов / Л.А. Бартоломей, И.В. Глушков, А.Г. Кузнецов // Развитие городов и геотехническое строительство. – М., 2006. – С. 48–53.
10. Отчет о результатах исследования несущей способности Сobiax-перекрытий из пустотелых блоков при нагрузке силами сдвига. Технический университет Дормштадта. – 2008. – 37 с.
11. Чураков, А.Г. Двухосная пустотная плита с инновационными видами пустот / А.Г. Чураков // Строительство уникальных зданий и сооружений, 2014. – № 6(21). – С.-Петербург. – С. 71–81.
12. Коцюра, И.П. Экспериментальные исследования балочного фрагмента монолитной многупустотной плиты перекрытия / И.П. Коцюра, Е.А. Деркач, Н.Н. Шалобита // Вестник ГТУ. – Т. 6, № 2. – 2016. – С. 74–82.
13. Сернов, В.А. Экспериментальные исследования свайно-плитных фундаментов из коротких конических свай на строительных площадках г. Минска / В.А. Сернов // Наука и техника. – Минск. – № 2. – 2015. – С. 66–72.
14. Грицук, М.С. Рациональные конструкции плитных фундаментов / М.С. Грицук. – Брест, 1997. – 218 с.

Материал поступил в редакцию 29.01.2018

SHVEDOVSKY P.V., POYTA P.S., KLEBANYUK D.N., SLIVKA D.N. Features of constructing of the tiled and tiled-pile foundations under framework and large-panel multistory building

The Article is sanctified to the problem to the features of constructing and decline of uneven deformability of the ground array under foundations of the pitch and multistory building erected in difficult engineer-geological terms. The recommendable systems of the closed cavities from the modules of hollow constructions of "Eco-Line" or "Slim-Line" allow to optimize the structural decisions of the tiled and tiled-pile foundations, executed both on piles with sloping sides, plastic pillows with power concrete preparations and with the curvilinear surfaces of leaning.

The suggested solutions allow to reduce the material consumption and cycle costs to 18% in comparison with traditional mitno-pili foundations, increasing their bearing capacity.

УДК 624.154.04

Чернюк В.П., Шляхова Е.И.

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

Введение. 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 пластину-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, в частности, из-за их работы в этих частях на изгиб.

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 $9...20^\circ$, 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 [1].

Чернюк Владимир Петрович, к.т.н., доцент кафедры технологии строительного производства Брестского государственного технического университета.

Шляхова Екатерина Ивановна, ассистент кафедры технологии строительного производства Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Таким образом, расчетная схема винтовой лопасти принимается в виде защемленной по внутреннему контуру кольцевой пластины с углом охвата 2π (рис. 1), загруженной 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 толщины винтовых лопастей в центральных радиальных сечениях лопасти (разрез А-А на рис. 1) допустимо вычислять как для замкнутых (сплошных) круглых пластин переменной толщины.

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 напряженно-деформированное состояние винтовых лопастей в этих частях было целесообразно определять методом конечных элементов, для чего применялся расчетно-вычислительный комплекс "Лири" [2].

Для описания расчетной схемы использовались треугольные конечные элементы тонких пластинок со следующими степенями свободы в каждом узле: W , $\frac{dw}{dx_1}$ и $\frac{dw}{dy_1}$, т. е. в узлах налагались

связи на вертикальные перемещения W из плоскости и углы поворота $\frac{dw}{dx_1}$ и $\frac{dw}{dy_1}$ по направлениям местной системы координат.

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 защемления в стволе к периферии. Исследования выполнялись для расчетных схем винтовых лопастей с соотношениями: $(R_\Lambda - r_c) / \delta = 6 \dots 16$, $R_\Lambda / r_c = 3.5$, где R_Λ – радиус винтовой лопасти; r_c – радиус ствола сваи, δ – толщина лопасти в защемлении, что позволило рассматривать их как тонкие пластины-оболочки. Материал 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 методом конечных элементов 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.

При анализе напряженно-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 справед-

ливость расчетных положений и формул. При этом вылет накладки а относительно ствола должен быть более $1/20$ вылета лопасти.

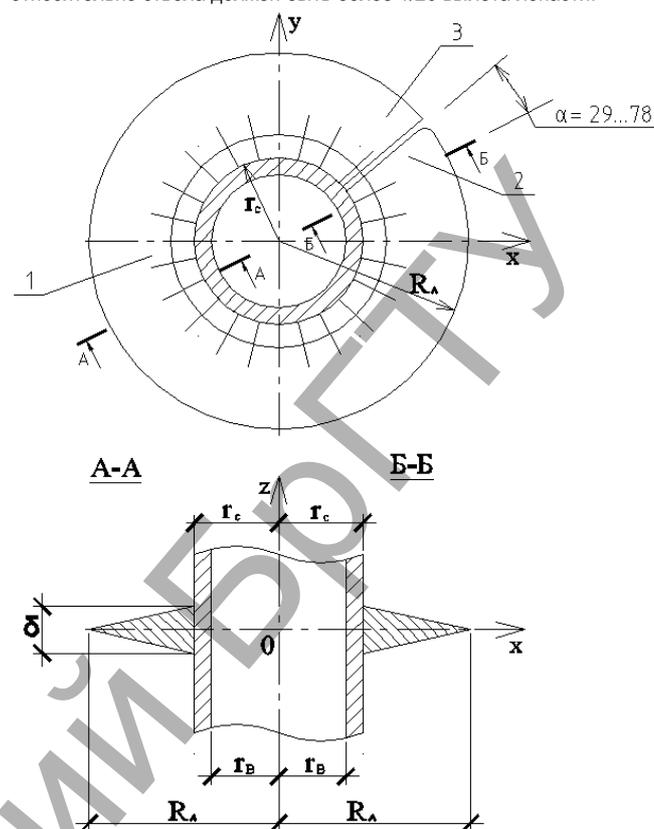


Рисунок 1 – Схема к расчету лопастей винтовых свай и анкеров в центральной (1), режущей передней (2), и хвостовой задней (3) частях

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 (в кН·м) в зоне заделки винтовой лопасти со стволом можно определять по следующим расчетным формулам:

– для лопастей постоянной толщины:

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

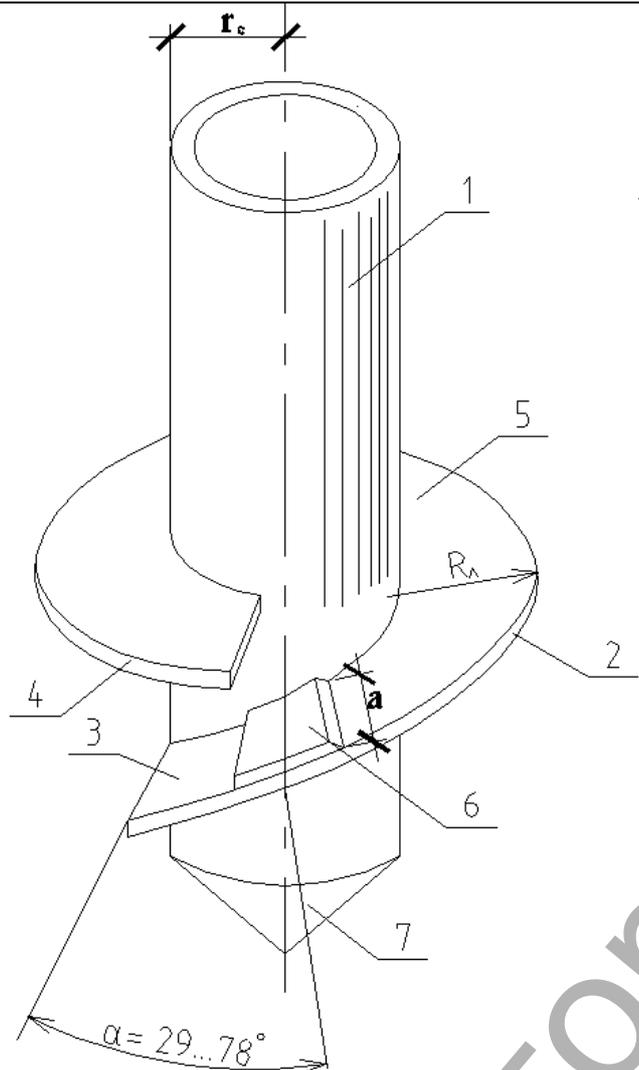
– для лопастей переменной толщины:

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

где q – интенсивность действия внешней нагрузки, кПа;

R_Λ и r_c – соответственно радиусы винтовой лопасти и ствола сваи, м.

В связи с тем, что значения M_r^{\max} определяются для заходного и хвостового сечений лопасти в зоне заделки их стволом на незначительном удалении от радиального разреза ($29 \dots 78^\circ$), 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):



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

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

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

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

где t_{\max} – максимальное значение толщины винтовой лопасти в зоне ее заделки в стволе сваи, 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 сваи, максимально к нему приближаясь, т.е. его необходимо определять (за счет варьирования показателей степени вогнутости Z), стремясь к максимально близкому совпадению расчетного и

фактического профилей винтовой лопасти при известном, рассчитанном по формуле (3) значением t_{\max} .

Пример

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:

материал лопасти-высокопрочный чугун марки ВЧ-50-1,5 с $R_u = 2,7 \cdot 10^5$ кПа; $E = 2 \cdot 10^8$ кПа; $\mu = 0,25$. Радиус ствола сваи $r_c = 15,55$ см при толщине лопасти в зоне заделки со стволом $\delta = 6 + 1,5$ см на скругление. Радиус винтовой лопасти $R_\lambda = 52,5$ см при $\delta = 1,75$ см. Средний радиус винтовой лопасти $r_{cp} = \frac{15,55 + 52,5}{2} = 34$ см при $\delta = 2,65$ см. Расчетная

выдергивающая нагрузка $P = 600$ кН. Интенсивность действия 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 $t = Hr^k = 0,0093r^{-1}$ ($H = 0,093, k = -1$).

При этом:

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

$$\delta = 0,06 \text{ м;}$$

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

$$\delta = 0,0175 \text{ м;}$$

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

$$\delta = 0,0265 \text{ м.}$$

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. Из-за длительности вычислений значения M_r позаимствуем из [5] при тех же исходных данных. Они будут соответственно равны:

$$M_{rc} = 98,287 \text{ кН·м;}$$

$$M_{r\lambda} = 0 \text{ кН·м;}$$

$$M_{rcp} = 10,8542 \text{ кН·м.}$$

Для всех трех расчетных центральных сечений толщины винтовой лопасти можно рассчитать по формулам (3).

$$t_{rc} = t_{\max} = \sqrt{\frac{6 \cdot 98,287}{1 \cdot 2,7 \cdot 10^5}} = 0,0467 \text{ м;}$$

$$t_{r\lambda} = \sqrt{\frac{6 \cdot 0}{1 \cdot 2,7 \cdot 10^5}} = 0 \text{ м;}$$

$$t_{rcp} = \sqrt{\frac{6 \cdot 10,8542}{1 \cdot 2,7 \cdot 10^5}} = 0,01555 \text{ м.}$$

Для расчета толщин в передней режущей и задней 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 $Z=0,5$). При этом степень соответствия фактического и приведенного профилей винтовой лопасти приведена в табл. 1 и показана на рис. 3 (кривые а и б).

$$M_{rc}^{max} = (14,8 - 2,6 \frac{0,1555}{0,525}) 760 \cdot 0,525^2 / 6 = 248 \text{ кНм,}$$

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);

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

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

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

Для наглядности и дальнейшего анализа все результаты вычислений толщин в трех сечениях лопасти (t_{rc} , t_{rcp} , t_{rA}) сведем в таблицу 1 и по ней построим четыре графика профилей винтовой лопасти-фактический (а), теоретический (б), расчетный (аналитический) для центральных частей лопасти (в) и расчетный (г) для режущей (хвостовой) частей лопасти (рис. 3). По вертикальной оси t масштаб толщины лопасти принят 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		
	$r_c=15,555$	$r_{cp}=34$	$R=52,5$
Фактическая (существующая)	6 ^{1,5}	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 к табл. 1: 6+1,5-фактическая толщина лопасти со скруглением на стволе (из них 6 см фактическая толщина лопасти, 1,5 см – скругление).

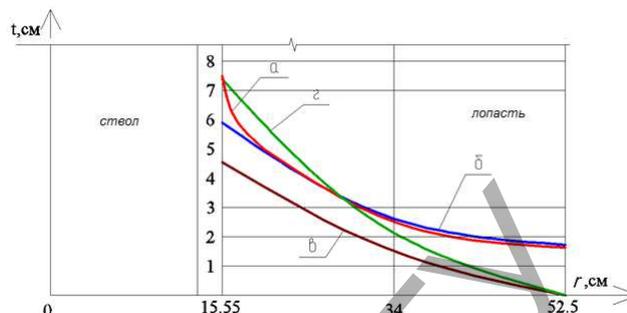


Рисунок 3 – Фактический (а), приведенный (б), расчетный в центральной части (в) и расчетный в заходной (хвостовой) части (г) профили лопасти винтовой сваи

Приведенные в таблице 1 данные и изображенные на рис. 3 кривые показывают, что во всех трех расчетных сечениях фактические (приведенные) толщины профиля лопасти винтовой части сваи СВ 30/105 превышают расчетные в тех же сечениях лопасти на выдерживающую 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 выдерживающих нагрузок.

Заключение. При проектировании и расчетах лопастей винтовых свай и анкеров следует иметь в виду, что заходные (режущие) и хвостовые (задние) их части всегда более загружены нагрузкой, т. к. работают на изгиб и, в отличие от центральных частей лопастей, рассчитываются по иному и нуждаются в утолщении или усилении.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Чернюк, В.П. Расчет и проектирование винтовых лопастей свай и анкеров как круглых пластин переменной толщины / В.П. Чернюк, В.П. Щербач, С.М. Семенюк // Вестник БрГТУ. – № 1: Строительство и архитектура. – 2016. – С. 151–155.
2. Мухин, А.В. К расчету и конструированию лопасти винтовой сваи / А.В. Мухин, В.П. Чернюк, В.Н. Пчелин, В.В. Спиридонов – Брест: Брестский инж.-строй. ин-т, 1998. – 8 с. – Деп. во ВНИИИС 27.01.88, № 8544, МФ НPSU0085444СА.
3. Богород, Л.Я. Винтовые сваи и анкеры в электросетевом строительстве / Л.Я. Богород – Москва : Энергия, 1967. – 200 с.
4. Тимощенко, С.П. Пластины и оболочки / С.П. Тимощенко, С.Войковский-Кригер. – Москва : Наука, 1966 – 635 с.
5. Чернюк, Владимир. Технические, технологические и прочностные расчеты винтовых свай / В. Чернюк, А. Бондарь, Е. Шляхова. – Германия : LAP LAMBERT Academic Publishing RU. – 2017. – 117 с.

Материал поступил в редакцию 08.09.2017

CHERNUK V.P., SHLYAHOVA E.I. Calculation and design of helical blades of piles and anchors in their cutting and tail parts by the finite element method

Calculations of helical blades of piles and anchors in the central and cutting (front, tail, back) parts differ due to the nature of their work at the base. In the first case, they work as continuous (not cut) plates of variable thickness, in the second - as cut. The stiffness and strength of helical blades of piles in that area parts are different. In the first case, they are higher; in the second case, they are lower. For this reason, the cutting and tail parts of blades are always more loaded, need to be reinforced and thicker. In the central parts - on the contrary. In this article provides a method for calculation of helical blades of piles and anchors in their cutting and tail parts, and also the design of helical piles protected by a.s. USSR.