

**Чернюк Владимир Петрович**, канд. техн. наук, доцент, Брестский государственный технический университет, г.Брест (Беларусь)

**Щербач Валерий Петрович**, доцент, Брестский государственный технический университет, г.Брест (Беларусь)

**Vladimir Chernyuk**, PhD in Engineering Science, associate professor, Brest State Technical University, Brest (Belarus)

**Valeriy Shcherbach**, associate professor, Brest State Technical University, Brest (Belarus)

## **РАСЧЕТ ВИНТОВЫХ ЛОПАСТЕЙ СВАЙ И АНКЕРОВ В ВИДЕ КОЛЬЦЕВЫХ ПЛАСТИН ПЕРЕМЕННОЙ ТОЛЩИНЫ**

### **PILES SPIRAL VANE DESIGN ASSUMING IT AS A VARIABLE WIDTH DISK**

#### **АННОТАЦИЯ**

*Изложены методика и порядок расчета винтовых лопастей свай и анкеров на действие вертикальных нагрузок путем решения известного общего дифференциального уравнения четвертого порядка как круглых пластин переменной толщины при гиперболическом очертании профиля лопасти.*

*Многие вопросы, связанные с проектированием круглых фундаментных плит, турбинных дисков, лопастей гидромашин, задвижек, клапанов, дисковых пружин, гибких соединений валов, в том числе винтовых лопастей свай и анкеров, приводятся к расчету круглых пластин переменной толщины.*

*Решения таких задач являются одними из актуальных в строительстве, которыми занимаются теория упругости и фундаментостроение.*

*Целью исследований является возможность производить расчеты толщин лопастей винтовых свай в любом расчетном сечении на требуемом расстоянии от оси сваи.*

*Известные способы расчета либо приближительны (расчет ведется как для консольной балки) или приводятся в специальных малоизвестных и редко применяемых гипергеометрических функциях, не обеспечивающих точного аналитического результата, либо даны только при фиксированном значении коэффициента Пуассона  $\mu=0,25$  и сложнейших нехарактерных случаях изгиба пластин. Все эти решения дают ориентировочные, приближительные, неточные или неверные результаты.*

*В настоящей статье приводится расчет винтовой лопасти сваи как круглой пластины переменной толщины при гиперболическом очертании профиля*

лопасти и произвольном значении коэффициента Пуассона  $\mu$  путем впервые решенного общеизвестного дифференциального уравнения четвертого порядка. Результаты подтверждены практическими расчетами прочности винтовых лопастей свай и анкеров.

## ABSTRACT

*This article shows a design method of piles spiral vane and anchors subjected to vertical load with the help of a well-known differential equation of a fourth grade assuming vane as a variable width disk concerning hyperbolic profile of a vane.*

*A lot of issues related to the design of circular foundation slabs, turbine disks, vanes of hydromachines, valves, including pile's spiral vane and anchors are solved by the design of variable width disk.*

*The solutions of the above mentioned issues are actual for construction and are usually achieved with the help of theory of elasticity and foundation engineering.*

*The object of the research is the ability to design widths of piles spiral vanes at any section at the required distance from the axis of a pile.*

*All well-known design methods are either approximate or described with the use of special little-known and rarely applied hypergeometric functions that do not provide with accurate results, or may be applicated only while Poisson ratio is equal to  $\mu=0,25$ . All those solutions lead to the achievement of approximate or false results.*

*This article shows a design method of piles spiral vane assuming vane as a variable width disk with a hyperbolic profile of a vane and random Poisson ratio with the help of the differential equation of the fourth grade solved for the first time. The results have been confirmed by experimental design of the strength of piles spiral vanes and anchors.*

**Ключевые слова:** винтовая свая, лопасть, круглая пластина, переменная толщина, гиперболический профиль, расчет, дифференциальное уравнение, коэффициент Пуассона

**Keywords:** screw pile, vane, disk, variable width, hyperbolic profile, design, differential equation, Poisson ratio

## ВВЕДЕНИЕ

Многие вопросы, связанные с проектированием круглых фундаментных плит, турбинных дисков, лопастей гидромашин, задвижек, клапанов, дисковых пружин, гибких соединений валов, в том числе винтовых лопастей свай и анкеров, приводятся к расчету круглых пластин переменной толщины. Решения таких задач являются одними из актуальных в строительстве, которыми занимаются теория упругости и фундаментастроение.

В известных способах расчета [1, 3] винтовые лопасти свай и анкеров рассматриваются как замкнутые кольцевые пластины переменной толщины, что не совсем точно соответствует их действительной работе, так как винтовые лопасти являются разрезными пластинами.

В [2] расчет винтовой лопасти выполнен по приближенной расчетной схеме, как расчет консольной балки переменного сечения, что не характеризует реальных условий работы лопасти в основании и дает завышенные результаты её толщины в центральных радиальных сечениях.

Анализ соответствующих исследований по расчету круглых пластин переменной толщины [2] показывает, что вследствие решения известного общего дифференциального уравнения изгиба круглых пластин переменного сечения результаты получены и приведены только для замкнутых (сплошных) круглых пластин постоянной и переменной толщины (линейного, экспоненциального, параболического, гиперболического, логарифмического и др. очертаний) при разнообразных характерах изгиба пластин (симметричном, асимметричном, циклически-симметричном, сложном), однако все эти решения приведены в специальных, малоизвестных и редко применяющихся гипергеометрических функциях, не обеспечивающих точного аналитического результата. Решения и функции представлены в виде рядов? и при пользовании ими необходимо применять табличные значения. В элементарных функциях приведены лишь отдельные не характерные случаи решения общего дифференциального уравнения при определенных законах изменения и значениях коэффициента Пуассона  $\mu$ . Для инженерных расчетов такие решения малоприемлимы.

В [1] представлено решение общего дифференциального уравнения изгиба круглой сплошной замкнутой пластины переменной толщины только при гиперболическом очертании профиля лопасти винтовой сваи или анкера и фиксированном значении коэффициента Пуассона  $\mu=0,25$ , что недостаточно точно отражает форму винтовой лопасти, фактические свойства её материала и наличие радиального разреза. В итоге расчеты винтовых лопастей дают явно заниженные результаты определения толщин сечений в хвостовой и заходной (режущей) частях лопасти.

## **ОСНОВНАЯ (ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ) ЧАСТЬ**

В общем случае лопасть винтовой сваи или анкера представляет собой незамкнутую (разрезную) винтовую пластину-оболочку, защемленную по центру к стволу сваи и работающую совместно с основанием. В отличие от сплошных неразрезных пластин постоянной или переменной

толщины винтовая лопасть является конструкцией пространственной, так как след лопасти на ступице ствола по высоте составляет 1,0...1,25 шага, а в плане она имеет 1,0...1,25 оборота. Также винтовая лопасть имеет радиальные разрезы в передней режущей и задней хвостовой частях, разведенных в разные стороны вдоль ствола сваи. Жесткость и прочность такой пространственной конструкции несколько выше жесткости и прочности плоской разрезной круглой пластины.

Однако в связи с тем, что расчет незамкнутой лопасти-оболочки, защемленной в стволе сваи и работающей совместно с основанием, аналитическими и численными методами реализовать весьма сложно и трудоемко, и в ряде случаев – практически невозможно, необходимо принятие некоторых допущений. Так как угол подъема серединной поверхности лопастей существующих свай и анкеров незначителен (изменяется в пределах 9...20%), то расчетную схему лопасти вполне допустимо принять в виде кольцевой круглой пластины, имеющей, в отличие от известных расчетных схем, разрез в радиальном направлении, то есть винтовую лопасть, конструкцию пространственную, имеющую радиальный разрез, можно рассматривать с достаточной степенью приближения как разрезную плоскую кольцевую пластину-оболочку постоянной или переменной толщины. Игнорирование пространственной работы лопасти, а также уменьшение её площади по сравнению с 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  $2\pi$  (рис. 1), нагруженной равномерно-распределенной нагрузкой  $q$  от действия внешних сил. При  $\varphi=0$  и  $\varphi=2\pi$  кольцевая пластина имеет свободные края, что соответствует радиальному разрезу лопасти. При таком подходе расчеты толщин в центральных радиальных сечениях лопасти при  $0<\alpha<2\pi$  (А-А на рисунке 1) допустимо выполнять как для замкнутых (сплошных) круглых пластин, а в передней режущей при  $\alpha\approx 0$  или задней хвостовой при  $\alpha\approx 2\pi$  (Б-Б на рисунке 1) – как для разрезных пластин-оболочек постоянной или переменной толщины.

При симметричном изгибе сплошной плоской пластины в случае равномерного распределения по поверхности лопасти нагрузки  $q$ , не связанной с прогибом и являющейся статической, дифференциальное уравнение изгиба круглой пластины переменной толщины четвертого порядка [2] в производных будет иметь вид:

$$W'''' + \frac{2}{r}W''' - \frac{1}{r^2}W'' + \frac{1}{r}W' + \frac{D'}{D} \left( 2W''' + \frac{2+\mu}{r}W'' - \frac{1}{r^2}W' \right) + \frac{D'}{D} \left( W'' + \frac{\mu}{r}W' \right) = \frac{q}{D}, \quad (1)$$

где  $W$  – прогиб пластины на расстоянии  $r$  от оси пластины;

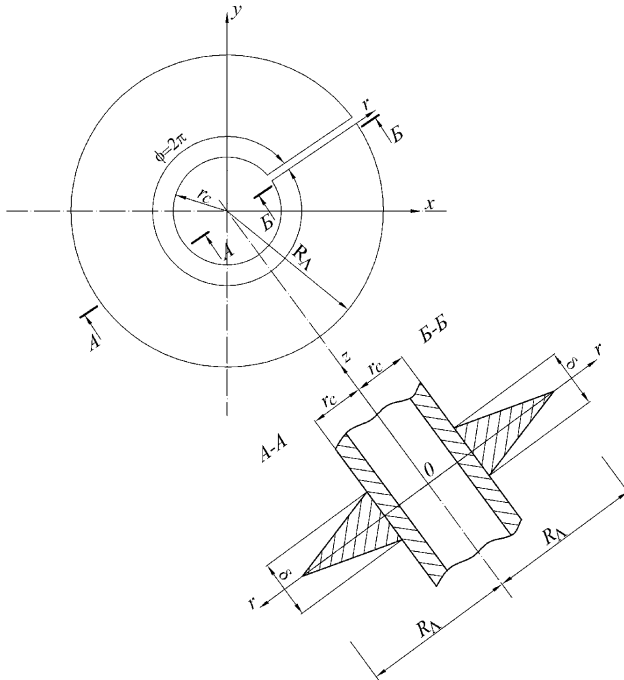
$W', W'', W''', W''''$  – первая-четвертая производные прогиба  $W$  по  $r$  соответственно.

Значения изгибающих моментов  $M_r$  и  $M_\phi$  после замены деформаций их выражениями будут определяться следующим образом:

$$M_r = -D \left( W'' + \frac{\mu}{r} W' \right); \quad M_\phi = -D \left( \mu W'' + \frac{1}{r} W' \right), \quad (2)$$

Из уравнения равновесия после подстановки выражений  $M_r$  и  $M_\phi$  можно получить значение перерезывающей силы в цилиндрическом сечении:

$$Q_r = -D \left( W''' + \frac{1}{r} W'' - \frac{1}{r^2} W' \right) + D' \left( W'' + \frac{\mu}{r} W' \right). \quad (3)$$



**Рисунок 1.** Схема к расчету лопастей винтовых свай и анкеров

Граничные условия могут быть следующими:

– так как пластина жестко защемлена по внутреннему контуру-кольцу радиуса  $r_c$ , где  $r_c$  – наружный радиус ствола, то геометрические требования такие:

$W(r_c) = 0$  (прогиб при  $r = r_c = 0$ );

$W'(r_c) = 0$  (угол поворота при  $r = r_c = 0$ );

– так как пластина по наружному контуру радиуса  $R_\Lambda$ , где  $R_\Lambda$  – радиус лопасти винтовой сваи, не зашпелена, то статические условия следующие:

$M_r(R_\Lambda) = 0$  (изгибающий момент в цилиндрическом сечении при  $r = R_\Lambda$  равен нулю), т.е.:

$$W''(R_\Lambda) + \frac{\mu}{R_\Lambda} W'(R_\Lambda) = 0;$$

$Q(R_\Lambda) = 0$  (перерезывающая сила в цилиндрическом сечении равна нулю), т.е.

$$W'''(R_\Lambda) + \frac{1}{R_\Lambda} W''(R_\Lambda) - \frac{1}{R_\Lambda^2} W'(R_\Lambda) + \frac{D'(R_\Lambda)}{D(R_\Lambda)} \left[ W''(R_\Lambda) + \frac{\mu}{R_\Lambda} W'(R_\Lambda) \right] = 0.$$

Принимаем гиперболическое очертание профиля пластины, как наиболее близкое к профилю лопасти винтовой сваи. В общем виде уравнение гиперболы будет выглядеть следующим образом:  $\frac{s}{2} = hr^k$ , где  $s$  – переменная толщина лопасти на расстоянии  $r$  от центра пластины;  $h$  – основание гиперболы;  $k$  – показатель гиперболы;  $r$  – расчетное сечение лопасти от центра пластины.

Для убывания толщины лопасти  $s$  к периферии значение показателя  $k$  должно быть всегда меньше нуля, т.е.  $k < 0$ , иначе профиль лопасти и ее толщина  $s$  к периферии будут возрастать, что нереально для лопастей винтовых свай.

Схема к расчету винтовой лопасти при гиперболическом очертании профиля пластины  $\frac{s}{2} = hr^k$  (при  $k < 0$ ) представлена на рисунке 2. При

этом значения  $h$  и  $k$  всегда можно подобрать таким образом, что на участке от  $r_c$  до  $R_\Lambda$  расчетный профиль пластины будет достаточно близко совпадать с фактическим или требуемым очертанием винтовой лопасти. Для представленной на рисунке 2 формы винтовой лопасти довольно близкое совпадение расчетного и фактического профилей обеспечивает кривая при  $h = 14$  и  $k = -1,25$ , но и это не является наиболее точным пределом.

Исходя из принятого гиперболического профиля поверхности лопасти винтовой сваи  $s = Hr^k$  ( $H=2h$ ,  $k \leq 0$ ) и выражения  $D = \frac{E \cdot s^3}{12(1 - \mu^2)}$ , будем иметь:

$$D = \frac{E}{12(1-\mu^2)} H^3 \cdot r^{3k}; \quad D' = \frac{E}{12(1-\mu^2)} H^3 \cdot 3kr^{3k-1}; \quad \frac{D'}{D} = \frac{3k}{r}$$

$$D'' = \frac{E}{12(1-\mu^2)} H^3 \cdot 3k \cdot (3k-1) \cdot r^{3k-2}; \quad \frac{D''}{D} = \frac{3k \cdot (3k-1)}{r^2}. \quad (4)$$

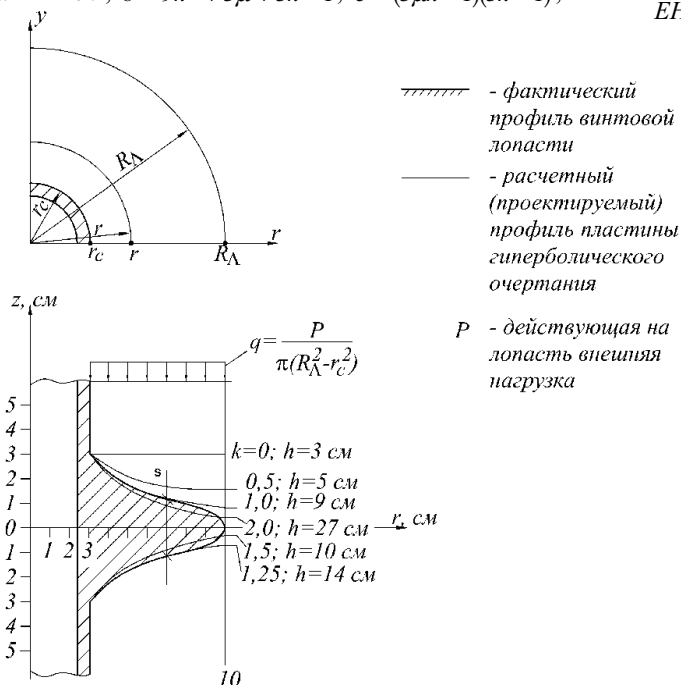
Подставляя полученные значения  $D$ ,  $\frac{D'}{D}$ ,  $\frac{D''}{D}$  в общее дифференциальное уравнение (1), получим:

$$W'''' + W'''' \left( \frac{2}{r} + \frac{2}{r} 3k \right) + W'' \left( -\frac{1}{r^2} + \frac{2+\mu}{r^2} 3k + \frac{3k(k-1)}{r^2} \right) + W' \left( \frac{1}{r^2} - \frac{3k}{r^2} + \frac{3\mu k(3k-1)}{r^2} \right) = \frac{12q(1-\mu^2)}{EH^3 r^{3k}}.$$

Преобразуем полученное уравнение в более удобный вид:

$$W'''' + \frac{a}{r} W'''' + \frac{b}{r^2} W'' + \frac{c}{r^3} W' = Ar^{-3k}; \quad (5)$$

где  $a = 2 + 6k$ ;  $b = 9k^2 + 3\mu + 3k - 1$ ;  $c = (3\mu k - 1)(3k - 1)$ ;  $A = \frac{12q(1-\mu^2)}{EH^3}$ .



**Рисунок 2.** Схемы к расчету плоской сплошной пластины переменной толщины

Решим уравнение (5) путем замены переменных:

$$W' = z; \quad W'' = z'; \quad W''' = z''; \quad W'''' = z'''.$$

Подставляя их в уравнение (5), получим:

$$r^3 z''' + ar^2 z'' + brz' + cz = Ar^{3(1-k)}. \quad (6)$$

Так как  $r > 0$ , заменим  $r = e^t$ ,  $t = \ln r$ ,  $dr = d(e^t) = e^t \cdot dt = rdt$ .

Определим производные  $z$  по  $r$ :

$$z' = \frac{dz'}{dr} = \frac{dz}{d(e^t)} = \frac{dz}{dt} \cdot \frac{1}{r};$$

$$z'' = \frac{dz'}{dr} = \frac{d}{dr} \left( \frac{dz}{dt} \cdot \frac{1}{r} \right) = \frac{d^2z}{dt^2} \cdot \frac{1}{r^2} - \frac{dz}{dt} \cdot \frac{1}{r^2} = \frac{1}{r^2} \left( \frac{d^2z}{dt^2} - \frac{dz}{dt} \right);$$

$$z''' = \frac{dz''}{dr} = \frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r^2} \left( \frac{d^2z}{dt^2} - \frac{dz}{dt} \right) \right] = -\frac{2}{r^3} \left( \frac{d^2z}{dt^2} - \frac{dz}{dt} \right) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{1}{r} \left( \frac{d^3z}{dt^3} - \frac{d^2z}{dt^2} \right) = \frac{1}{r^3} \left( \frac{d^3z}{dt^3} - \frac{3d^2z}{dt^2} + \frac{2dz}{dt} \right).$$

Подставим значения  $z'$ ,  $z''$ ,  $z'''$  в уравнение (6):

$$\frac{d^3z''}{dt^3} - 3 \frac{d^2z}{dt^2} + 2 \frac{dz}{dt} + a \frac{d^2z}{dt^2} - a \frac{dz}{dt} + b \frac{dz}{dt} + cz = Ae^{3t(1-3k)}.$$

В производных это уравнение будет иметь вид:

$$z''' + (a-3)z'' + (b-a+2)z' + cz = Ae^{3t(1-k)}, \quad (7)$$

где  $z'$ ,  $z''$ ,  $z'''$  – производные функции  $z$  по  $t$ .

Уравнение (7) уже является дифференциальным неоднородным уравнением третьего порядка, которое до этого никто не решал, и для решения которого составим характеристическое уравнение:

$$\lambda^3 + (a-3)\lambda^2 + (b-a+2)\lambda + c = 0. \quad (7a)$$

Подставляя в это уравнение значения  $a$ ,  $b$ ,  $c$  из обозначений к уравнению (5) и решая его относительно  $\lambda$ , получим выражения корней кубического характеристического уравнения:

$$\lambda_1 = 1-3k; \quad \lambda_2 = -\frac{3}{2}k + d; \quad \lambda_3 = -\frac{3}{2}k - d, \quad (7b)$$

$$\text{где } d = \sqrt{\frac{9k^2 - 12\mu k + 4}{4}}.$$

Так как подкоренное выражение  $9k^2 - 12\mu k + 4 \geq 0$  при любых значениях  $k \leq 0$  (уравнение гиперболы) и  $\mu$ , корни характеристического уравнения (7b)  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  будут всегда действительными и разными, т.е.  $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3$ , а следовательно, общее решение уравнения (7) можно представить в виде:

$$z = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + C_3 e^{\lambda_3 t},$$

где  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  – произвольные постоянные.

Определим частное решение уравнения (7). Заметим, что  $\lambda_1 \neq \lambda_2 \neq \lambda_3 \neq (1-k)$ , поэтому частное решение (7) будем искать в виде:

$$z_1 = Q e^{3t(1-k)},$$

где  $Q$  – постоянная искомая величина.



Определим производные  $z_1$  по  $t$ :

$$z_1' = 3Q(1-k)e^{3t(1-k)}; z_1'' = 9Q(1-k)^2 e^{3t(1-k)}; z_1''' = 27Q(1-k)^3 e^{3t(1-k)}.$$

Подставляя значения  $z_1, z_1', z_1'', z_1'''$  из предыдущих выражений в уравнение (7) и решая его относительно  $Q$  с подстановкой значения

$$A = \frac{12q(1-\mu^2)}{EH^3}, \text{ после преобразования получим:}$$

$$Q = \frac{12q(1-\mu^2)}{2EH^3(3\mu k - 9k + 8)}. \quad (8)$$

Таким образом, общим решением уравнения (7) будет:

$$z = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + C_3 e^{\lambda_3 t}.$$

Возвратимся обратно к переменной  $r$ , учитывая что  $t = \ln r$  ( $r > 0$ ),  $z = w_1'$ , получим:

$$w' = C_1 r^{\lambda_1} + C_2 r^{\lambda_2} + C_3 r^{\lambda_3} + Q r^{3(1-k)}.$$

Дальнейшее решение этого уравнения для нахождения функции  $w = f(r)$  не имеет смысла, так как в выражениях изгибающих моментов  $M_r$  и  $M_\phi$  (2) и перерезывающей силы  $Q$  (3) представлены только производные функции  $w$  по  $r$ , т.е.  $w', w'', w'''$ , а не  $w$ .

Для определения значений постоянных величин  $c_1, c_2, c_3$  из граничных условий составим систему трех уравнений с тремя неизвестными и в результате решения этой системы уравнений получим:

$$\left. \begin{aligned} C_3 &= -QR_\Lambda^{3(1-k)-\lambda_3} \cdot \frac{\frac{A}{m^{\lambda_1}} - \frac{B}{m^{\lambda_2}} + \frac{C}{m^{3(1-k)}}}{\frac{a}{m^{\lambda_1}} - \frac{b}{m^{\lambda_2}} + \frac{c}{m^{\lambda_3}}}; \\ C_2 &= -C_3 \frac{b}{c} \cdot R_\Lambda^{\lambda_3-\lambda_2} - Q \frac{B}{B} R_\Lambda^{3(1-k)-\lambda_2}; \\ C_1 &= C_3 \frac{a}{c} \cdot R_\Lambda^{\lambda_3-\lambda_1} + Q \frac{A}{C} R_\Lambda^{3(1-k)-\lambda_1}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

$$\text{где } m = \frac{R_\Lambda}{r_c};$$

$$\begin{aligned}
 a &= (\lambda_3^2 - 1)(\lambda_2 + \mu) - (\lambda_2^2 - 1)(\lambda_3 + \mu), \\
 b &= (\lambda_3^2 - 1)(\lambda_1 + \mu) - (\lambda_1^2 - 1)(\lambda_3 + \mu), \\
 c &= C = (\lambda_2^2 - 1)(\lambda_1 + \mu) - (\lambda_1^2 - 1)(\lambda_2 + \mu), \\
 A &= (8 - 18k + 9k^2)(\lambda_2 + \mu) - (3 + \mu - 3k)(\lambda_2^2 - 1), \\
 B &= (8 - 18k + 9k^2)(\lambda_1 + \mu) - (3 + \mu - 3k)(\lambda_1^2 - 1).
 \end{aligned}$$

Таким образом, при известных значениях  $C_1, C_2, C_3$  находится общее решение дифференциального уравнения  $W'$ ,  $M_r, M_\phi$  и перерезывающей силы  $Q_r$  из выражений (2), (3).

Момент  $M_r$  в произвольном цилиндрическом сечении на расстоянии  $r$  от центра, определяющий толщину винтовой лопасти по первому уравнению (2), будет равен:

$$M_r = -D \left[ C_1 (\lambda_1 + \mu) r^{\lambda_1 - 1} + C_2 (\lambda_2 + \mu) r^{\lambda_2 - 1} + C_3 (\lambda_3 + \mu) r^{\lambda_3 - 1} + Q(3 + \mu - 3k) r^{2-3k} \right]. \quad (10)$$

После определения значений  $M_r$  в интересующих нас сечениях можно произвести расчет толщин этих сечений или выполнить проверку их прочности на изгиб по известным формулам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При применении изложенного способа расчета винтовой лопасти порядок выполнения устанавливается следующим:

- задается для проектируемой или подбирается для реальной винтовой лопасти гиперболический профиль пластины  $s = Hr^k$  путем варьирования значениями  $H$  и  $k$  при известных значениях  $r_c$  и  $R_\Lambda$ ;
- устанавливаются расчетные сечения в пределах от  $r_c$  до  $R_\Lambda$  на расстоянии  $r$  от центра лопасти. Из уравнения профиля лопасти  $s = Hr^k$  определяются проектные толщины  $s_r$  во всех сечениях лопасти;
- по (4) в расчетных сечениях вычисляются значения  $D$ ;
- по (7б) устанавливаются значения корней характеристического уравнения (7а)  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ;
- по (8) подсчитывается значение  $Q$ ;
- по (9) последовательно рассчитываются величины  $m, a, b, c, A, B, C, C_1, C_2, C_3$ ;
- по (10) во всех сечениях вычисляются значения изгибающих моментов  $M_r$ ;
- по известным всем формулам производится проверка прочности или определяется толщина сечения лопасти.

В первом случае сравниваются фактические и расчетные сопротивления на изгиб, во втором – расчетные толщины с фактическими или проектными, определенными ранее толщинами сечения лопасти.

Для наглядности авторами в [4, 5] произведен расчет и проектирование винтовых лопастей свай в соответствии с настоящей методикой и порядком расчета. Данная методика распространяется на расчет и проектирование винтовых лопастей свай только в центральных сечениях лопастей, в заходных и хвостовых радиальных сечениях расчеты следует выполнять другим способом (методом конечных элементов) по иным расчетным формулам согласно [4, 5].

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Богорад, Л. Я. Винтовые сваи и анкеры в электросетевом строительстве / Л. Я. Богорад. – М. : Энергия, 1967. – 200 с.
2. Иродов, М. Д. Применение винтовых свай в строительстве / М. Д. Иродов. – М. : Стройиздат, 1968. – 148 с.
3. Коваленко, А. Д. Круглые пластины переменной / А. Д. Коваленко. – М. : Физматгиз, 1959. – 294 с.
4. Чернюк, В. П. Винтовые сваи и анкеры в строительстве / В. П. Чернюк, В. Н. Пчелин, В. Н. Черноиван. – Минск : Ураджай, 1993. – 178 с.
5. Чернюк, В. П. Расчет, проектирование и устройство свайных фундаментов / В. П. Чернюк, П. С. Пойта. – Брест : Облтипография, 1998. – 216 с.

### **REFERENCES**

1. Bogorad L. Ya. *Vintovyye svai i ankery v elektrosetevom stroitelstve* [Screw piles and anchors in electricity supply network construction]. Moscow: Energiya, 1967. 200 p. (rus)
2. Irodov M. D. *Primeneniye vintovykh svay v stroitelstve* [Application of screw piles in construction]. Moscow : Stroyizdat, 1968. 148 p. (rus)
3. Kovalenko A. D. *Kruglyye plastiny peremennoy* [Disks of a variable]. Moscow: Fizmatgiz, 1959. 294 p. (rus)
4. Chernyuk V. P., Pchelin V. N., Chernoiivan V. N. *Vintovyye svai i ankery v stroitelstve* [Screw piles and anchors in construction]. Minsk : Uradzhay, 1993. 178 p. (rus)
5. Chernyuk V. P., Poyta P. S. *Raschet, proektirovanie i ustroystvo svaynykh fundamentov* [Design and arrangement of piles foundations]. Brest : Obltipografiya, 1998. 216 p. (rus)

*Статья поступила в редколлегию 11.11.2015*