

## ТРАНСПОРТНОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

629.113

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫХОДА РОТОРНО-ВИНТОВОЙ МАШИНЫ ИЗ ВОДЫ НА БЕРЕГ

Инж. А. В. СОГИН, д-р техн. наук, проф. В. А. ШАПКИН

*Изложены теоретические исследования движения роторно-винтовой машины в водо-грунтовой среде. Результатами исследования являются аналитические выражения для сил, действующих на машину при выходе из воды на берег. Они послужат основой для математического моделирования движения роторно-винтовой машины в водо-грунтовой среде и выбора параметров физической модели для экспериментальных исследований.*

*Theoretical evidence of a screw-rotor machine motion on water-soil environment are stated in this article. Results of probe are analytical expressions for the forces influence on the machine at wedging out. They will form a basis for mathematical modeling movement of the screw-rotor machine in water-soil environment and a choice of parameters of physical model for experimental researches.*

Универсальность роторно-винтового движителя заключается в том, что он сочетает в себе качества как гидравлического, так и сухопутного движителя и может с достаточной эффективностью работать на таких средах, как вода, слабонесущие и заболоченные грунты, снег, лед.

Специфичность работы роторно-винтового движителя обусловлена как конструктивными особенностями, так и особенностями размещения отдельных его частей относительно корпуса.

Процесс выхода машины на берег рассматривается состоящим из двух этапов, разных по физической природе. На первом этапе используется инерция движущейся на плаву массы роторно-винтовой машины. За счет накопленной энергии машина должна выйти на край берега первым витком лопасти ротора. На втором этапе она движется благодаря сцеплению ротора с береговым грунтом и за счет силы упора об воду (силы тяги на воде).

**Первый этап выхода на берег.** При расчете объема воды, вытесненного роторно-винтовым движителем, полагаем, что

- передние и задние заходные части движителя вытесняют пренебрежимо малый объем воды по сравнению с базовым цилиндром и их водоизмещение не учитываем;

- корпус машины не погружен в воду, такое допущение взято потому, что водоизмещающий корпус не изменяет физическую природу происходящих процессов и методику расчета;

- в начальный момент времени первого этапа вся масса машины приходится на воду (машина не опирается на берег);

- в конечный момент времени первого этапа половина массы машины приходится на берег, половина — на воду.

Общий порядок расчета на этом этапе преследует следующие цели: определить время прохождения первого этапа — длины линии скольжения (от точки касания машины края берега до касания с грунтом первого витка лопасти); определить предельно допустимые начальные скорости движения машины (при предельном ускорении) при переменных значениях угла наклона конусной передней части ротора  $\psi$ .

Находящаяся на плаву машина с некоторой начальной скоростью  $\dot{x}$  подходит к берегу. Форма носовой части корпуса представлена наклонной плоскостью, расположенной под углом  $\psi$  к поверхности (рис. 1).

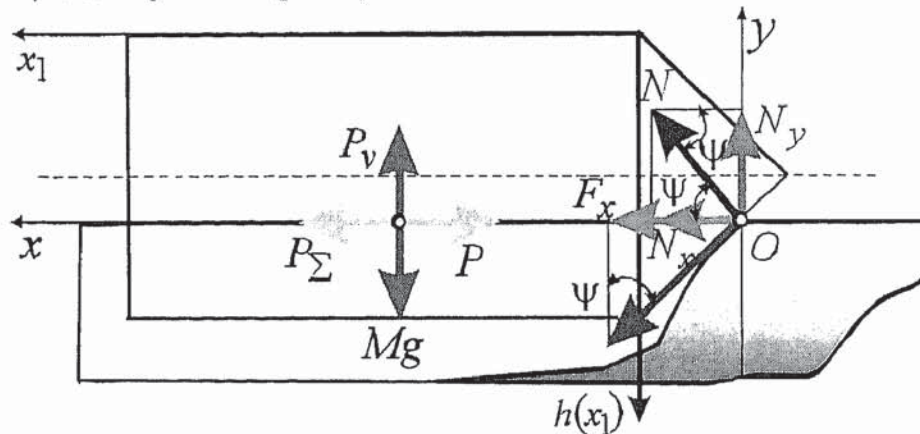


Рис. 1. Силы действующие на роторно-винтовую машину на первом этапе выхода из воды на берег

Точка контакта машины с краем берега  $O$  перемещается по наклонной носовой плоскости вниз, при этом носовая часть машины поднимается, берег воспринимает все большую часть веса машины, а водоизмещающая часть корпуса уменьшается. Центр тяжести машины поднимается вверх. На рис. 1 представлена схема сил, действующих на РВМ на первом этапе выхода на берег.

На машину действуют силы:  $Mg$  — сила тяжести;  $P$  — сила тяги роторов на воде (упор);  $R_{\Sigma}$  — суммарное сопротивление движению роторно-винтовой машины в воде;  $P_v$  — выталкивающая сила;  $N$  — сила нормальной реакции грунта и  $F$  — сила трения в точке контакта носовой части корпуса с грунтом  $O$ ;  $\psi$  — угол наклона передней части ротора (угол «атаки»).

Дифференциальное уравнение поступательного выхода машины на берег запишем так:

$$M\ddot{x} = R_{\Sigma} - P + F_x + N_x. \quad (1)$$

Нормальная реакция со стороны берега

$$N_y = Mg - P_v \quad N = \frac{N_y}{\sin \psi} \quad N_x = N \cos \psi. \quad (2)$$

После подстановки получаем

$$N_x = (Mg - P_v) \operatorname{ctg} \psi. \quad (3)$$

Сила трения передней части о край берега

$$F = Nf_{\text{тр}}. \quad (4)$$



После подстановки получаем

$$F_x = (Mg - P_v) f_{\text{тр}}. \quad (5)$$

Тогда запишем уравнение (1)

$$M\ddot{x} = R_x - P + (Mg - P_v) f_{\text{тр}} + (Mg - P_v) \text{ctg}\psi. \quad (6)$$

Перепишем это уравнение так, чтобы выделить слагаемые, в которые входит переменная с учетом  $P_v = \rho V_p$ , где  $V_p$  — объем вытесняемой ротором воды

$$M\ddot{x} = R_x - P - 2(f_{\text{тр}} + \text{ctg}\psi) \rho V_p + (f_{\text{тр}} + \text{ctg}\psi) Mg. \quad (7)$$

В правой части выражения в первые три слагаемые:  $R_x$ ,  $P$  и  $2(f_{\text{тр}} + \text{ctg}\psi) \rho V_p$  входит объем вытесняемой ротором воды  $V_p$ , который изменяется по мере наезда машины на берег (изменения переменной  $x$ ).

Вычислим площадь погруженной в воду части ротора как функции глубины погружения ротора  $h$ . По формуле для площади сегмента (рис. 2)

$$S_d(h) = 0,5r^2 (\beta - \sin \beta), \quad \beta = 2 \arccos \frac{h-r}{r}.$$

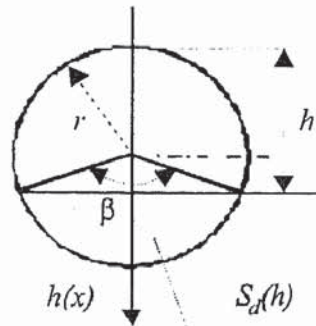


Рис. 2. Определение площади погруженной в воду части ротора как функции глубины погружения ротора  $h$

После подстановки получаем

$$S_d(h) = 0,5r^2 \left[ 2 \arccos \frac{h-r}{r} - \sin \left( 2 \arccos \frac{h-r}{r} \right) \right].$$

Выразим глубину погружения ротора как функцию перемещения по длине ротора в подвижной системе координат по оси  $x_1$  (рис. 3)

$$\begin{aligned} h(x_1) &= Ax_1 + B, \\ h(0) &= h_1, \quad B = h_1, \\ h(L) &= h_2, \quad A = \frac{h_2 - h_1}{L}, \\ h(x_1) &= \frac{h_2 - h_1}{L} x_1 + h_1. \end{aligned} \quad (8)$$

После подстановки последнего выражения в (7) получим

$$S_d(x_1) = 0,5r^2 \left[ 2\arccos \frac{(h_2 - h_1)L^{-1}x_1 + h_1 - r}{r} - \sin \left( 2\arccos \frac{(h_2 - h_1)L^{-1}x_1 + h_1 - r}{r} \right) \right]. \quad (9)$$

Тогда объем вытесненной одним роторно-винтовым движителем воды будет

$$V_p(x) = \int_0^L S_d(x_1) dx_1, \quad (10)$$

$$V_p(x) = \int_0^L 0,5r^2 \left[ 2\arccos \frac{(h_2 - h_1)L^{-1}x_1 + h_1 - r}{r} - \sin \left( 2\arccos \frac{(h_2 - h_1)L^{-1}x_1 + h_1 - r}{r} \right) \right] dx_1. \quad (11)$$

Как видно из последнего выражения, значение интеграла  $V_p(x)$  будет определяться значениями  $h_1$  и  $h_2$ . Последние меняются в каждый момент времени в зависимости от перемещения ротора.

В случае водоизмещающего корпуса в расчет вводится дополнительный переменный объем  $V_k(x) = \int_0^L S_k(x_1) dx_1$ , который находится аналогично объему  $V_p(x)$ .

Поскольку аналитическое определение  $h_1$  и  $h_2$  как функций  $x$  сопряжено с известными трудностями, введем допущение и будем решать уравнение (6) численно пошаговым методом.

Полагаем, что в конечный момент времени первого этапа половина массы машины приходится на берег, половина — на воду. Тогда

$$V_p(x_{\text{конеч}} = 0, h_{1\text{конеч}} = d, h_{2\text{конеч}}) = \frac{M}{2\rho}, \quad (12)$$

откуда находим  $h_{2\text{конеч}}$ .

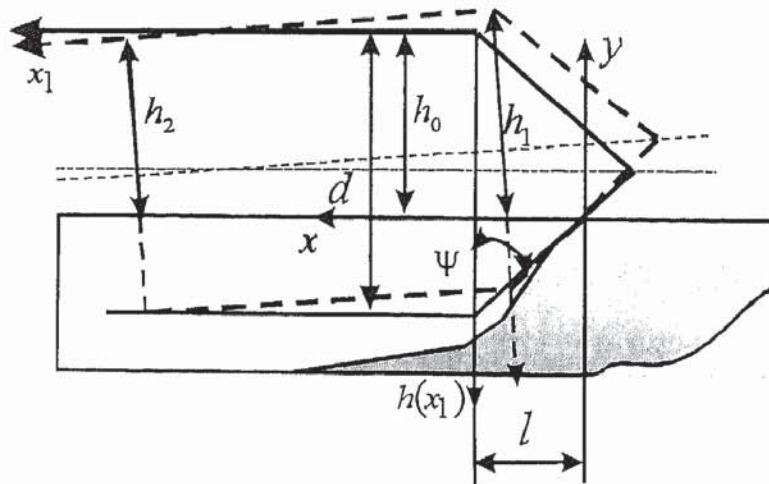


Рис. 3. Определение глубины погружения роторов как функции перемещения по продольной оси машины при поступательном наезде на берег

Полагаем, что в начальный момент времени первого этапа вся масса машины приходится на воду. Тогда

$$V_p(x_{\text{нач}} = l, h_{1\text{нач}} = h_0, h_{2\text{нач}} = h_0) = \frac{M}{\rho}. \quad (13)$$

Все множество значений  $h_1$  от  $h_{1\text{конеч}}$  до  $h_{1\text{нач}}$  и  $h_2$  от  $h_{2\text{конеч}}$  до  $h_{2\text{нач}}$  делим на  $m$  равных частей. Полагаем, что за малый промежуток времени  $h_1$  и  $h_2$  изменяются на величины  $\Delta h_1$  и  $\Delta h_2$  соответственно

$$\begin{aligned} h_{1\text{конеч}} - h_{1\text{нач}} &= d - h_0 = \Delta h_1 m, \\ h_{2\text{конеч}} - h_{2\text{нач}} &= h_{2\text{конеч}} - h_0 = \Delta h_2 m. \end{aligned} \quad (14)$$

Далее решаем уравнение (6) для  $m$  шагов, на каждом из которых вычисляем значение интеграла (11), а следовательно, и сил в правой части (6) для  $h_1 = \Delta h_1 i$ , где  $i = 1, \dots, m$ ,  $h_2 = \Delta h_2 i$ , где  $i = 1, \dots, m$ .

Поскольку машина подходит к берегу с постоянной скоростью, начальным условием будет

$$R_x - P - 2(f_{\text{тр}} + \text{ctg}\psi)\rho V_p + (f_{\text{тр}} + \text{ctg}\psi)M_g = 0. \quad (15)$$

Уравнение (15) применялось для описания динамики поступательного выхода на кромку, что позволило определить время выхода и конечную скорость поступательного движения корпуса.

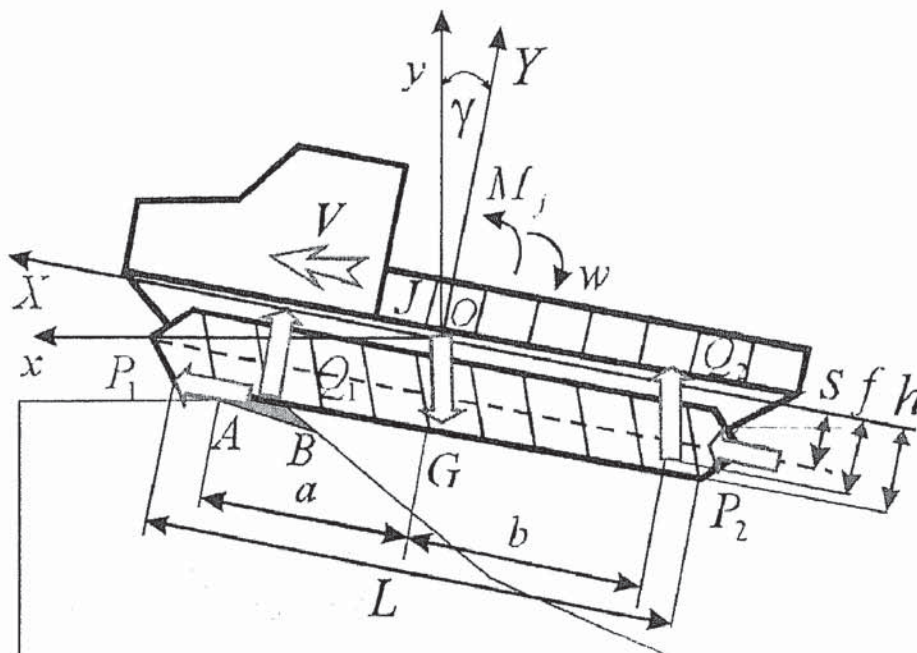


Рис. 4. Силы, действующие на роторно-винтовую машину на втором этапе выхода на берег

**Второй этап выхода на берег.** Второй этап выхода на берег начинается, когда роторно-винтовая машина зацепляется первым витком реборды движителя за берег (рис. 4). На рисунке показано:  $G$  — масса машины;  $P_1 = \varphi_c Q_1$  — сила тяги роторов на береговом грунте;  $\varphi_c$  — коэффициент сцепления РВД с береговым грунтом;  $Q_1$  — реакция грунта на роторы;  $P_2$  — сила тяги роторов гидродинамическая (упор);  $Q_2$  — гидростатическая сила, действующая на роторы;  $J$  — сила инерции, приложенная в центре масс;  $M_j$  — момент силы инерции относительно центра масс;  $O$  — центр масс;  $\gamma$  — угол подъема;



$v$  — линейная скорость машины;  $\omega$  — угловая скорость машины;  $L$  — длина базового цилиндра ротора;  $a$  — текущая переменная, удовлетворяющая условию:  $0 \leq a \leq \frac{L}{2}$ ;  $h_n$  — высота реборды (лопасти) роторно-винтового движителя;  $AB$  — линия сдвига грунта;  $xOy$  — система координат, жестко связанная с грунтом;  $XOY$  — система координат, жестко связанная с машиной.

Составим уравнения движения машины в проекциях на оси координат  $xOy$  согласно принципу Даламбера

$$\begin{aligned} \sum F_x &= 0, \\ \sum F_y &= 0, \\ \sum M_0 &= 0, \\ P_1 \cos \gamma - Q_1 \sin \gamma + P_2 \cos \gamma + J \cos \gamma &= 0, \\ Q_1 \cos \gamma - P_1 \sin \gamma + P_2 \cos \gamma + Q_2 - G + J \sin \gamma &= 0, \\ Q_1 a + P_1 h + P_2 s + Q_2 (f \sin \gamma - b \cos \gamma) - M_j &= 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Вынося в первом уравнении за скобку  $\cos \gamma$ , а во втором уравнении  $\sin \gamma$ , получим

$$\begin{aligned} Q_1 (\varphi_c - \tan \gamma) + P_2 &= -J, \\ Q_1 + (\varphi_c - c \tan \gamma) + P_2 + Q_2 \sin^{-1} \gamma - G \sin^{-1} \gamma &= -J, \\ Q_1 (a + \varphi_c h_p) + P_2 s - Q_2 b \cos \gamma &= M_j, \end{aligned} \quad (17)$$

поскольку  $P_1 = \varphi_c Q_1$ , а слагаемое  $c f$  опущено в виду его малости по сравнению с величиной  $b \cos \gamma$ . Силы  $P_2$  и  $Q_2$  можно представить также в виде

$$P_2 = P_{O_2} \frac{2a}{L}, \quad Q_2 = Q_{O_2} \frac{2a}{L}, \quad (18)$$

где  $P_{O_2}$ ,  $Q_{O_2}$  — соответственно гидродинамическая и гидростатическая силы, действующие на полностью погруженные в воду роторно-винтовые движители.

Из первых двух выражений системы получаем дифференциальное линейное неоднородное уравнение второго порядка

$$m \frac{d^2 a}{dt^2} \left( \frac{\tan \gamma + c \tan \gamma}{\tan \gamma - \varphi_c} \right) - \frac{2a}{L} \left( P_{O_2} \frac{\tan \gamma + c \tan \gamma}{\tan \gamma - \varphi_c} + \frac{Q_{O_2}}{\sin \gamma} \right) + \frac{mg}{\sin \gamma} = 0. \quad (19)$$

Интегрируя данное выражение при начальных условиях  $t=0, a=a_0, \frac{da}{dt} = v_0$  и обозначив

$$\begin{aligned} A &= \frac{\tan \gamma + c \tan \gamma}{\tan \gamma - \varphi_c}, \\ B &= \sin \gamma - \varphi_c \cos \gamma, \\ C &= \frac{L}{2m}, \end{aligned} \quad (20)$$

получим

$$\begin{aligned} v &= v_0 \exp[-C(P_{O_2} + BQ_{O_2})], \\ a &= a_0 - \frac{v - v_0}{C(P_{O_2} + BQ_{O_2})}. \end{aligned} \quad (21)$$

Параметр  $B$  можно назвать приведенным коэффициентом сцепления применительно к рассматриваемому случаю. Величина  $C$  определяет косвенно приемистость машины. Увеличение гидродинамической силы  $P_{O_2}$  и увеличение плавучести (гидростатической силы)  $Q_{O_2}$  способствует облегчению выхода машины на берег. Увеличение  $\gamma$  и уменьшение  $\varphi_c$  отрицательно влияет на выход машины из полыньи.

Силу тяги на воде при полностью погруженных РВД определим по методике, изложенной выше. Из приведенных в этом разделе зависимостей видно, что гидродинамическая сила тяги  $P_{O_2}$  возрастает с увеличением диаметра и числа оборотов ротора.

С увеличением плавучести убывает угол  $\gamma$  и возрастает величина  $f$ . Тем самым облегчается выход машины на берег.

Большое влияние на процесс выхода машины с РВД из воды на берег оказывает конструктивное исполнение винтовой лопасти РВД и соотношение ее параметров с размерами базового цилиндра.

Для того, чтобы выход машины был успешным, необходимо, чтобы сила  $P_1$  сцепления лопасти с грунтом была не менее вполне определенной величины, которую можно принять из

$$P_1 \geq 0,5G_1 \sin \gamma. \quad (22)$$

Эта сила зависит от высоты лопасти  $h_n$ , диаметра РВД  $D$ , угла наклона машины  $\gamma$  и от прочностных свойств берегового грунта, определяемых величиной предельных касательных напряжений  $\tau = \frac{P_1}{F}$ , где  $F$  — площадь сдвига.

Во время наблюдения за процессом выхода роторно-винтовых машин на берег было замечено, что грунтовый массив сдвигается по цилиндрической поверхности  $AB$ .

Положив  $AB = \lambda$ , можно для площади цилиндрической поверхности сдвига грунта получить выражение

$$F = 0,5\lambda D \arccos\left(\frac{d}{D}\right). \quad (23)$$

Подставив  $\lambda = \frac{Dh}{\sin 2\gamma}$  получим

$$F = \frac{Dh}{\sin 2\gamma} \arccos\left(\frac{d}{D}\right). \quad (24)$$

Сила сцепления лопасти с грунтом не может быть больше величины

$$P_1 = \tau F, \quad (25)$$



поэтому можем записать, что  $\tau F \geq 0,5G_1 \sin \gamma$  или

$$\frac{\tau h D}{\sin 2\gamma} \arccos \frac{d}{D} \geq G_1 \sin \gamma. \quad (26)$$

Полученное неравенство позволило найти количественное соотношение между прочностными свойствами берегового грунта и весовыми и конструктивными параметрами машины.

Рассмотрим последнее уравнение моментов в системе (17). Представим его в виде

$$M_{J_z} \frac{d^2 \gamma}{dt^2} = Q_{o_2} b \frac{2a}{L} - P_{o_2} S - Q_1 a - Q_1 h_n \varphi, \quad (27)$$

где  $M_{J_z}$  — момент силы инерции относительно оси  $z$ .

Упрощая задачу, можно считать процесс выхода машины на берег равномерным и происходящим за некоторое время  $T$ . Полагая начальные условия: в исходный момент времени при  $t_0 = 0$  угол подъема машины  $\gamma = 0$ , ускорение машины равно нулю, проинтегрируем последнее выражение. Из полученного выражения можем заключить, что большее значение для устойчивости выхода имеет плавучесть роторов, описываемая гидростатической силой  $Q_2$  и длина базового цилиндра ротора  $L$ .

Таким образом, наряду с известными рекомендациями по выбору конструктивных параметров, полученные аналитические выражения дают возможность комплексного подхода к решению вопроса выбора параметров для наиболее типичных условий эксплуатации роторно-винтовых машин.

### Выводы

1. Получены аналитические зависимости для сил, действующих на машину при выходе из воды на берег.
2. Выявлены закономерности, связывающие геометрические и гидромеханические параметры роторно-винтового двигателя с его способностью выходить из воды на берег.
3. Разработана комплексная методика расчета процесса выхода из воды на берег (расчет скорости, ускорения и времени выхода на берег, прогнозирование возможности выхода на берег).