

УДК 532.59:629.576

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ВОЛНОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СВПА ПРИ ЕГО НЕСТАЦИОНАРНОМ ДВИЖЕНИИ ПО ПОЛЮ БИТОГО ЛЬДА

В. М. Козин, А. В. Погорелова*

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет,
681013 Комсомольск-на-Амуре

* Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, 681005 Комсомольск-на-Амуре
E-mail: sasha@imim.ru

Рассматривается прямолинейное нестационарное движение амфибийного судна на воздушной подушке (СВПА) по поверхности водоема, покрытого мелкобитым льдом, при различных режимах изменения скорости. Анализируется влияние глубины водоема, параметров флотации и режима движения на волновое сопротивление судна. Предлагаются способы маневрирования, позволяющие повысить или понизить волновое сопротивление СВПА.

Ключевые слова: несжимаемая жидкость, мелкобитый лед, амфибийное судно на воздушной подушке, нестационарное движение, волновое сопротивление.

1. Данная работа является продолжением работы [1]. Гидродинамическая задача о движущемся по битому льду амфибийном судне на воздушной подушке (СВПА) моделируется с помощью системы поверхностных давлений [2], перемещающейся над весомой свободной поверхностью флотирующей жидкости [3, 4].

Рассматривается бесконечная область, покрытая битым льдом, по которой со скоростью $u(t)$ перемещается заданная система поверхностных давлений $q(x, y, t)$. Совмещенная с судном система координат располагается следующим образом: плоскость xOy совпадает с невозмущенной поверхностью раздела лед — вода, направление оси x совпадает с направлением движения судна, ось z направлена вертикально вверх. Предполагается, что вода — идеальная несжимаемая жидкость плотностью ρ_2 , движение жидкости потенциальное. Поверхностная плотность флотирующей жидкости $m(x, y)$ задается непрерывной функцией [3]:

$$m(x, y) = \rho_1(x, y)h(x, y) = \rho_1^0 s_1(x, y)h(x, y).$$

Здесь $\rho_1(x, y)$ — “размазанная” по поверхности жидкости плотность льда; ρ_1^0 — физическая плотность льда; $s_1(x, y)$ — безразмерная функция, характеризующая плотность льда ($0 \leq s_1 \leq 1$); $h(x, y)$ — толщина льда. В дальнейшем предполагается, что величины ρ_1 и h постоянные.

Согласно [2, 5] волновое сопротивление, действующее на СВПА, вычисляется по формуле

$$R = \iint_{(\Omega)} q \frac{\partial w}{\partial x} dx dy,$$

где Ω — область распределения нагрузки $q(x, y, t)$; $w(x, y, t)$ — деформация поверхности флотирующей жидкости, определяемая в линейной теории волн в заданной системе координат следующим образом [1]:

$$w = -\frac{q}{\rho_2 g} - \frac{1}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial t} \Big|_{z=0} + \frac{u}{g} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_{z=0} - \frac{\rho_1 h}{\rho_2 g} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t \partial z} \Big|_{z=0} + \frac{u \rho_1 h}{\rho_2 g} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial z} \Big|_{z=0}.$$

Искомая функция потенциала скорости $\Phi(x, y, z, t)$ должна удовлетворять уравнению Лапласа $\Delta \Phi = 0$ и линеаризованным граничным условиям [1]:

$$\begin{aligned} m \left(\frac{\partial^3 \Phi}{\partial t^2 \partial z} - u'_t \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial z} - 2u \frac{\partial^3 \Phi}{\partial t \partial x \partial z} + u^2 \frac{\partial^3 \Phi}{\partial x^2 \partial z} \right) = \\ = -\rho_2 g \frac{\partial \Phi}{\partial z} - \rho_2 \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - u'_t \frac{\partial \Phi}{\partial x} - 2u \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t \partial x} + u^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x} \quad \text{при } z = 0, \\ \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad \text{при } z = -H \end{aligned}$$

($H = H_1 - b$; H_1 — глубина водоема; $b = \rho_1 h / \rho_2$ — глубина погружения льда при статическом равновесии). Для больших глубин, когда H_1 значительно больше h , можно считать $H \approx H_1$.

При условии, что в момент времени $t = 0$ судно не имеет хода и отсутствуют любые возмущения, кроме статической деформации свободной поверхности, начальные условия для функции $\Phi(x, y, z, t)$ записываются в виде [1]

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\rho_1 h}{\rho_2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z \partial t} \right) \Big|_{z=0} = 0.$$

Предполагается, что закон изменения скорости движения судна (системы поверхностных давлений) в зависимости от времени можно приближенно выразить формулой

$$\begin{aligned} u = u_1 \operatorname{th}(\mu_1 t) + (u_2 - u_1)(\operatorname{th}(\mu_2(t - t_2)) + \operatorname{th}(\mu_2 t_2))/2 + \\ + (u_3 - u_2)(\operatorname{th}(\mu_3(t - t_3)) + \operatorname{th}(\mu_3 t_3))/2, \quad (1.1) \end{aligned}$$

где u_1, u_2, u_3 — значения скоростей, на которые последовательно выходит судно; μ_1, μ_2, μ_3 — коэффициенты, характеризующие ускорение (торможение) судна; значения t_2 и t_3 соответствуют моментам времени, в которые ускорение судна равно $\mu_2(u_2 - u_1)/2$ и $\mu_3(u_3 - u_2)/2$ соответственно, и являются также точками перегиба графика функции $u(t)$. В данной работе исследуются различные режимы изменения скорости судна (1.1) (режимы движения) в зависимости от времени: 1) разгон — движение с заданной скоростью; 2) разгон — движение с заданной скоростью — торможение до полной остановки; 3) разгон — движение с первой заданной скоростью — разгон — движение со второй заданной скоростью; 4) разгон — движение с первой заданной скоростью — торможение — движение со второй заданной скоростью; 5) разгон — движение с заданной скоростью — торможение до полной остановки — разгон — движение с заданной скоростью.

В соответствии с (1.1) расстояние, пройденное судном, вычисляется по формуле

$$s = \frac{u_1}{\mu_1} \ln(\operatorname{ch}(\mu_1 t)) + \frac{u_2 - u_1}{2} \left(\frac{1}{\mu_2} \ln \frac{\operatorname{ch}(\mu_2(t - t_2))}{\operatorname{ch}(\mu_2 t_2)} + \operatorname{th}(\mu_2 t_2) t \right) + \\ + \frac{u_3 - u_2}{2} \left(\frac{1}{\mu_3} \ln \frac{\operatorname{ch}(\mu_3(t - t_3))}{\operatorname{ch}(\mu_3 t_3)} + \operatorname{th}(\mu_3 t_3) t \right). \quad (1.2)$$

В качестве системы перемещающихся давлений $q(x, y)$ используется функция [1, 6]

$$q(x, y) = \frac{q_0}{4} \left[\operatorname{th} \left(\alpha_1 \left(x + \frac{L}{2} \right) \right) - \operatorname{th} \left(\alpha_1 \left(x - \frac{L}{2} \right) \right) \right] \left[\operatorname{th} \left(\alpha_2 \left(y + \frac{L}{2\omega} \right) \right) - \operatorname{th} \left(\alpha_2 \left(y - \frac{L}{2\omega} \right) \right) \right],$$

где q_0 — номинальное давление; L — длина судна; $\omega = L/B$ — удлинение судна; B — ширина судна; α_1, α_2 — параметры, характеризующие отклонение распределения давления в продольном и поперечном направлениях от прямоугольной формы. Чем больше значения α_1, α_2 , тем ближе форма распределения давления к прямоугольной. При $\alpha_1 \rightarrow \infty, \alpha_2 \rightarrow \infty$ давление q эквивалентно давлению q_0 , равномерно распределенному по прямоугольнику. Для лучшего согласования результатов вычислений с экспериментальными данными в работе [6] предложено использовать значения $\alpha_1 L = \alpha_2 L = 10$.

Аналогично работе [1] задача решается аналитически с использованием преобразований Фурье и Лапласа. В результате получается следующая интегральная формула для расчета волнового сопротивления СВПА:

$$\frac{R}{D} = \frac{Aq_0}{\rho_2 g L}, \quad D = q_0 L B, \\ A = \frac{\pi^2 \omega}{2(\alpha_1 \alpha_2)^2 L} \int_0^t u(\tau) \int_0^\infty \cos \left((t - \tau) \sqrt{\frac{g \rho_2 \lambda \operatorname{th}(\lambda H)}{\rho_1 h \lambda \operatorname{th}(\lambda H) + \rho_2}} \right) \lambda \times \\ \times \int_{-\lambda}^{\lambda} \cos(\alpha(s(t) - s(\tau))) \frac{\sin^2(\alpha L/2) \sin^2(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} L/(2\omega)) \alpha^2}{\operatorname{sh}^2(\pi \alpha/(2\alpha_1)) \operatorname{sh}^2(\pi \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}/(2\alpha_2)) \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}} d\alpha d\lambda d\tau. \quad (1.3)$$

Здесь $u(\tau)$ вычисляется по формуле (1.1), $s(t), s(\tau)$ — по формуле (1.2).

2. Численные расчеты по формуле (1.3) проводились при $\alpha_1 L = \alpha_2 L = 10, \rho_1^0 = 900 \text{ кг/м}^3, \rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3, \omega = 2$.

На рис. 1,а показано изменение волнового сопротивления судна в зависимости от времени при $H = 3 \text{ м}, L = 10 \text{ м}$ ($\varepsilon = \rho_1 h/(\rho_2 L)$ — параметр флотации). Кривые 1–5 для битого льда соответствуют режимам изменения скорости, показанным на рис. 1,б кривыми с теми же номерами. Кривые 6–8 на рис. 1,а для чистой воды соответствуют режимам изменения скорости, показанным на рис. 1,б кривыми 1–3. Из результатов анализа рис. 1 следует, что волновое сопротивление судна существенно зависит от скорости, до которой оно разгоняется. Обычно скорости, при которых судно имеет максимальное волновое сопротивление, называют критическими. На рис. 1,а кривые 1, 6 соответствуют волновому сопротивлению при выходе судна в первом режиме движения на докритическую скорость, кривые 2, 7 — на околоскритическую скорость, кривые 3, 8 — на сверхкритическую скорость. Видно, что максимального волнового сопротивления судно достигает при движении с критической скоростью. В случае движения по битому льду при докритических скоростях происходит увеличение, а при критических и сверхкритических скоростях — некоторое уменьшение волнового сопротивления по сравнению с волновым сопротивлением при движении по чистой воде (при выходе на стационар). Данный вывод согласуется с результатами работы [7], полученными в случае стационарного движения СВПА. Кроме того,

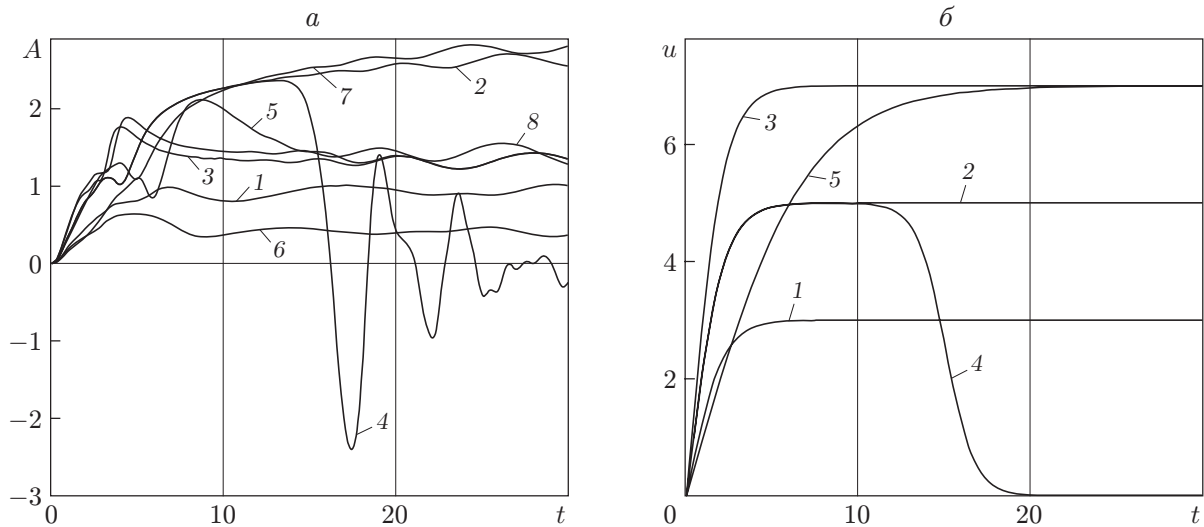


Рис. 1. Зависимости волнового сопротивления (*a*) и скорости судна (*б*) от времени при $H = 3$ м, $L = 10$ м:

1 — $u_1 = u_2 = u_3 = 3$ м/с, $\mu_1 = 0,5$ с⁻¹, $\varepsilon = 0,045$; 2 — $u_1 = u_2 = u_3 = 5$ м/с, $\mu_1 = 0,5$ с⁻¹, $\varepsilon = 0,045$; 3 — $u_1 = u_2 = u_3 = 7$ м/с, $\mu_1 = 0,5$ с⁻¹, $\varepsilon = 0,045$; 4 — $u_1 = 5$ м/с, $u_2 = u_3 = 0$, $\mu_1 = 0,5$ с⁻¹, $t_2 = 15$ с, $\mu_2 = 0,6$ с⁻¹, $\varepsilon = 0,045$; 5 — $u_1 = u_2 = u_3 = 7$ м/с, $\mu_1 = 0,15$ с⁻¹, $\varepsilon = 0,045$; 6 — $u_1 = u_2 = u_3 = 3$ м/с, $\mu_1 = 0,5$ с⁻¹, $\varepsilon = 0$; 7 — $u_1 = u_2 = u_3 = 5$ м/с, $\mu_1 = 0,5$ с⁻¹, $\varepsilon = 0$; 8 — $u_1 = u_2 = u_3 = 7$ м/с, $\mu_1 = 0,5$ с⁻¹, $\varepsilon = 0$

кривые 1–3, 6–8 с течением времени выходят на стационарные значения [6, 7] волнового сопротивления и в дальнейшем почти не меняются, сохраняя волнообразный характер. Из анализа кривой 4 на рис. 1, *a* следует, что при торможении судна до нулевой скорости волновое сопротивление несколько раз меняет знак и волнообразно стремится к нулю. Такое изменение волнового сопротивления, по-видимому, объясняется тем, что при торможении гидродинамическая волна опережает судно. При этом СВПА сначала опускается на подошву волны, затем оказывается на той стороне волны, где величина $\partial w/\partial x < 0$, после чего судно оказывается на гребне следующей волны, которая шла за ним, и т. д. После того как все гидродинамические волны обгонят судно, его волновое сопротивление уменьшается до нуля. Анализ поведения кривых 3, 5 на рис. 1, *a* показывает, что чем больше начальное ускорение (кривая 3), тем меньше основной горб волнового сопротивления при выходе на сверхкритическую скорость в первом режиме движения. Заметим, что начальное ускорение при движении первого типа равно $a = \mu_1 u_1$. Таким образом, для того чтобы выйти на заданную сверхкритическую скорость с наименьшим волновым сопротивлением, СВПА необходимо разогнаться до этой скорости с максимальным ускорением.

Как известно, при стационарном и равноускоренном режимах движения СВПА критическая скорость зависит от глубины водоема [1, 6, 7]. На рис. 2 представлены зависимости безразмерного параметра критической скорости $k_L^* = gL/u_1^2$ при движении судна в первом режиме от безразмерного параметра глубины водоема $\gamma = H/L$. Эти зависимости соответствуют как стационарному [7], так и равноускоренному движению СВПА в битом льду [1] и на чистой воде [6].

На рис. 3 представлены зависимости волнового сопротивления и скорости судна от времени при различных режимах выхода на критическую скорость в первом, третьем, четвертом и пятом режимах движения при $H = 3$ м, $L = 10$ м, $\varepsilon = \rho_1 h/(\rho_2 L) = 0,045$, $\mu_2 = 0,6$ с⁻¹, $t_2 = 15$ с. Кривые 1, 2 соответствуют выходу на критическую скорость

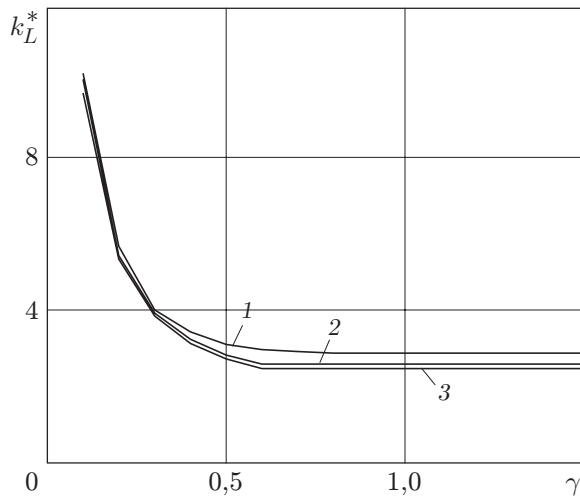


Рис. 2. Зависимость безразмерного параметра критической скорости k_L^* от безразмерной глубины γ при различных значениях ε :

1 — $\varepsilon = 0,045$; 2 — $\varepsilon = 0,0225$; 3 — $\varepsilon = 0$

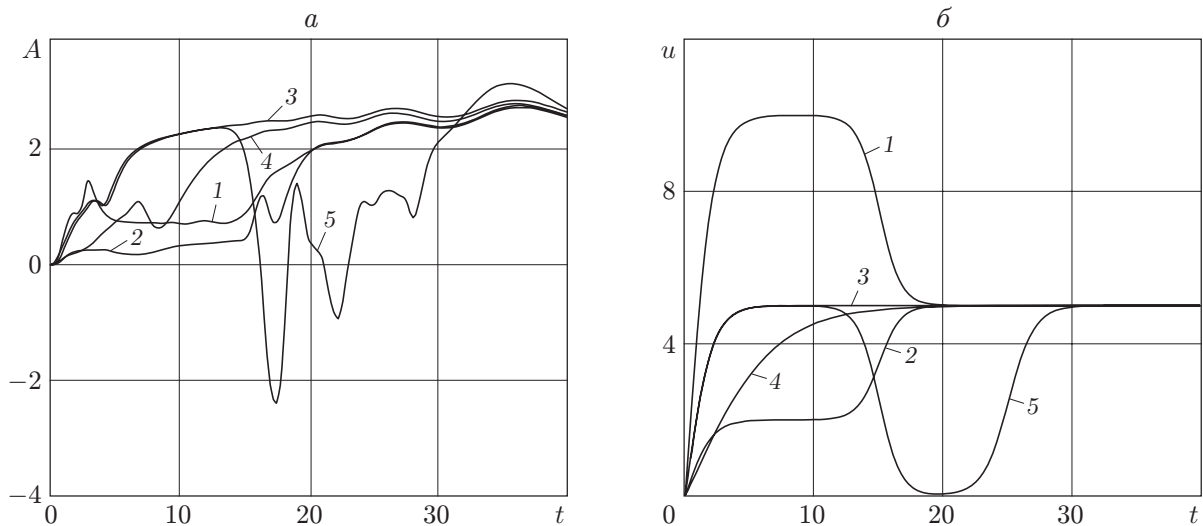


Рис. 3. Зависимости волнового сопротивления (а) и скорости (б) СВПА от времени при различных режимах выхода на критическую скорость ($H = 3$ м, $L = 10$ м, $\varepsilon = 0,045$, $\mu_2 = 0,6$ с $^{-1}$, $t_2 = 15$ с):

1 — $u_1 = 10$ м/с, $u_2 = u_3 = 5$ м/с, $\mu_1 = 0,5$ с $^{-1}$; 2 — $u_1 = 2$ м/с, $u_2 = u_3 = 5$ м/с, $\mu_1 = 0,5$ с $^{-1}$; 3 — $u_1 = u_2 = u_3 = 5$ м/с, $\mu_1 = 0,5$ с $^{-1}$; 4 — $u_1 = u_2 = u_3 = 5$ м/с, $\mu_1 = 0,15$ с $^{-1}$; 5 — $u_1 = 5$ м/с, $u_2 = 0$, $u_3 = 5$ м/с, $\mu_1 = 0,5$ с $^{-1}$, $\mu_3 = 0,5$ с $^{-1}$, $t_3 = 25$ с

в четвертом и третьем режимах движения. Кривые 3, 4 соответствуют волновому сопротивлению при выходе на критическую скорость в первом режиме движения с начальными ускорениями $a = 2,5; 0,75$ м/с 2 . Из анализа кривых 3, 4 следует, что максимальное волновое сопротивление быстрее достигается при выходе на критическую скорость в первом режиме движения с наибольшим ускорением. При выходе на критическую скорость в третьем и четвертом режимах движения (кривые 2, 1) волновое сопротивление хотя и стремится к своему критическому значению, но уже не принимает максимальных значений, соответствующих данной критической скорости. Кривая 5 на рис. 3, а соответствует волновому сопротивлению при выходе на критическую скорость в пятом режиме движения. При таком режиме выход судна на критическую скорость, затем его торможение до полной остановки и повторный выход на критическую скорость позволяют получить более высокое волновое сопротивление.

3. Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Максимальное волновое сопротивление при движении судна в битом льду возникает при выходе на критическую скорость, которая зависит от глубины водоема, основных характеристик судна и параметра флотации. Для снижения волнового сопротивления рекомендуется двигаться с докритической скоростью либо выходить на заданную сверхкритическую скорость с максимальным ускорением. При проведении ледокольных работ с целью разрушения берегового припая, дальнейшего измельчения битого льда или разрушения заторов и зажоров, представляющих собой нагромождения мелкобитого льда и являющихся причиной разрушительных наводнений, целесообразно использовать режим движения СВПА с максимальной крутизной волны. Для этого предлагается двигаться в соответствии с пятым режимом, т. е. вывести судно на критическую скорость, затем затормозить, а после того как волна обгонит судно, вновь выйти на критическую скорость.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Козин В. М., Погорелова А. В.** Влияние битого льда на волновое сопротивление СВПА при нестационарном режиме движения // ПМТФ. 1999. Т. 40, № 6. С. 48–53.
2. **Бенуа Ю. Ю.** Основы теории судов на воздушной подушке / Ю. Ю. Бенуа, В. К. Дьяченко, Б. А. Колызаев и др. Л.: Судостроение, 1970.
3. **Хейсин Д. Е.** Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1967.
4. **Габов С. А.** Об одной задаче гидродинамики идеальной жидкости, связанной с флотацией // Дифференц. уравнения. 1988. Т. 24, № 1. С. 16–21.
5. **Большаков В. П.** Волновое сопротивление системы поверхностных давлений // Тр. XIII Науч.-техн. конф. Науч.-техн. о-ва судостроит. пром-сти по теории корабля, Ленинград, 10–15 сент. 1963 г. Л.: Изд-во Центр. науч.-исслед. ин-та им. А. Н. Крылова, 1963. Вып. 49. С. 68–88.
6. **Doctors L. J., Sharma S. D.** The wave resistance of an air cushion vehicle in steady and acceleration motion // J. Ship Res. 1972. V. 16, N 4. P. 248–260.
7. **Козин В. М., Милованова А. В.** Волновое сопротивление амфибийных судов на воздушной подушке в битом льду // ПМТФ. 1996. Т. 37, № 5. С. 24–28.

Поступила в редакцию 14/IV 2006 г.