

Ю.А. Москвичева
ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛЕДОКОЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ
НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведена постановка и решение задачи приоритетного проектирования ледокольных платформ на воздушной подушке. За критерий эффективности принят минимум энергетических затрат на подъем и движение судна в ледовых условиях.

Ключевые слова: ледяной покров, разрушение, платформы на воздушной подушке, приоритетное проектирование.

Одним из перспективных способов разрушения ледяного покрова и создания ледового канала для проводки судов является применение ледокольных платформ на воздушной подушке (ЛПВП). Движение таких платформ в ледовых условиях характеризуется относительно низкими скоростями (~ до 10 км/ч) и высокими давлениями в воздушной подушке (ВП) ~ до 10 кПа. При прогнозировании основных элементов ЛПВП сформулируем задачу проектирования как экстремальную задачу математического программирования.

Элементы множества факторов внешней среды \vec{W} образуют вектор технического задания на проектирование

$$\vec{C} = \vec{C}(C_1 + C_2 \dots C_i) \quad (1)$$

В состав вектора \vec{C} входят: толщина льда – h , высота торосов – h_m , ширина ледового канала B_k , автономность – A , численность экипажа – n . Вектор оптимизируемых параметров проекта \vec{X} содержит компоненты, характеризующие ЛПВП:

$$\vec{X} = \vec{X}(x_1, x_2 \dots x_n) \quad (2)$$

К таким элементам относятся: площадь ВП в плане, отношение длины ВП к ширине $m = L_{ВП} / B_{ВП}$, главные размерения и форма корпуса, размерения и форма гибкого ограждения

(ГО), суммарная мощность энергетической установки на подъем и движение ЛПВП – N_Σ , давление в ВП – $P_{ВП}$, расход воздуха – $Q_{ВП}$. Компоненты вектора \vec{X} имеют ограничения на диапазон возможных значений. Ограничения данного типа являются параметрическими [1] и в общем виде записываются так:

$$(\vec{X})_{min} \leq \vec{X} \leq (\vec{X})_{max} \quad (3)$$

В большинстве случаев ограничения выражаются математически в виде равенств и неравенств, связанных условиями эксплуатации и требованиями, указанными в техническом задании. Поэтому возникает ещё система функциональных ограничений

$$G_j(\vec{X}, \vec{C}) \geq \vec{A}_j(\vec{C}), \quad j = 1, \dots, m \quad (4)$$

где функция \vec{G}_j представляет собой оценки j -х качеств судна, а \vec{A}_j – требования к этим качествам (в том числе и требования нормативных документов). Примером неравенств (4) может служить уравнение масс, уравнение остойчивости, плавучести, мощности и т.п. Очевидно, что векторов \vec{X} , удовлетворяющих условиям (3) и (4) может быть несколько, что приводит к нескольким вариантам проектов судна. Для отбора лучшего варианта вводится функция эффективности или функция цели [1,7]

$$\vec{Z}(\vec{X}, \vec{C}) \rightarrow Extr \quad (5)$$

Для рассматриваемой задачи целесообразно функцию цели выбрать с позиций технической и экономической эффективности, которые запишем в виде:

$$\begin{aligned} N_\Sigma(\vec{X}, \vec{C}) &\rightarrow min, \\ Q_\Sigma(\vec{X}, \vec{C}) &\rightarrow min, \end{aligned} \quad (6)$$

где Q_{Σ} – суммарные затраты на строительство и эксплуатацию судна.

Совокупность зависимостей (1-6) образует математическую модель проектируемого судна. Попутно отметим, что ряд параметров ЛПВП оказывают на функцию цели противоположный эффект. Так, увеличение площади ВП, выгодное для разрушения льда, приводит к увеличению расхода воздуха из ВП и возрастанию мощности привода нагнетателя, а уменьшение площади ВП связано с увеличением давления для разрушения льда и возрастанию сопротивления при движении и мощности.

Зависимости для определения энергетических затрат запишем в виде:

$$N_{\Pi} = \frac{P Q_{\text{ВП}}}{\eta}, N_{\text{б}} = Rv \quad (7)$$

где N_{Π} – мощность на подъем и движение ЛПВП соответственно, кВт;

$Q_{\text{ВП}}$ – напор, развиваемый нагнетателем, кПа;

R – сопротивление ЛПВП при движении в ледовых условиях, кН;

v – скорость движения, м/с;

η – КПД нагнетателя

Для решения задачи воспользуемся математическими моделями функционирования подсистем [3,6,7,8] и частично дополненными. Необходимый напор (давление) вентилятора:

$$P = P_{\text{ВП}} + \Delta P_1 \quad (8)$$

где $P_{\text{ВП}}$ – давление в ВП, необходимое для разрушения ледяного покрова, кПа [3]

$$P_{\text{ВП}} = \frac{K_p h^2}{r^2} \left(1 + \frac{r^2}{S_{\text{ВП}}} \right), \quad (9)$$

где K_p – удельная энергия разрушения ледяного покрова (при движении с образованием ледового канала $P_{\text{ВП}} = 1300 \pm 100$ кПа;

h – толщина льда, м;

r – характерный линейный размер при изгибе ледяной пластины, м.

$$r = \sqrt[4]{\frac{E h^3}{12(1-\mu^2)\rho_v g}},$$

E – модуль упругости ледяной пластины, кПа ;

μ – коэффициент Пуассона для льда ;

ρ_v – плотность воды, т/м³ ; g – ускорение свободного падения, м/с² ;

$S_{\text{ВП}}$ – площадь ВП, м²;

ΔP – потеря напора в воздуховоде (в первом приближении можно принимать $\Delta P = (0,2 \div 0,3) P_{\text{ВП}}$ [4]

Расход воздуха из ВП можно записать в виде, м³/с

$$Q_{\text{ВП}} = \Pi h_{\text{э}} \sqrt{\frac{2P_{\text{ВП}}}{\rho_{\text{возд}}}}, \quad (10)$$

где Π – периметр ВП, м;

$h_{\text{э}}$ – эффективный зазор, который с учетом сжатия воздушных струй можно принять равным 0,0075 м [3];

$\rho_{\text{возд}}$ – плотность воздуха т/м³

По данным наших исследований [7] – оптимальная форма ВП в плане – квадратная.

Сопротивление ЛПВП $R_{\text{ЛПВП}}$ запишем в виде [5]:

$$R_{\text{ЛПВП}} = R_p + R_{\text{тр}} + R_{\text{обл}} + R_v, \quad (11)$$

где R_p – сопротивление, связанное с разрушением ледяного покрова;

$R_{\text{тр}}$ – сопротивление от трения ГО о лед;

$R_{\text{обл}}$ – сопротивление от взаимодействия обломков льда с ГО;

R_v – сопротивление воды.

Очевидно, что составляющие сопротивления каким-то образом взаимозависимы, однако при анализе примем гипотезу об их независимости.

В [4] получено:

$$R_p + R_{тр} = P_{ВП} B_{ВП} \left(\frac{P_{ВП}}{\rho_B g} - K_W \sqrt{h} \right) - \frac{P_{ВП}^2}{2\rho_B g} + f \frac{P_{ВП}^2 B}{\rho_B g \sin \gamma} \quad (11)$$

где K_W – эмпирический коэффициент. При движении ЛПВП можно принять $K_W = 0,28 \text{ м}^{0,5}$;
 f – коэффициент трения материала гибкого ограждения о лед. По данным наших исследований при использовании в качестве материала ГО «Виниплан Arctic»
 $f \approx 0,065$.

γ – угол наклона ГО к горизонту ($\zeta \approx 45-50^\circ$)

Как показали наши исследования, сопротивление обломков льда, включенное в (11) играет существенную роль при движении ЛПВП в поле битого, а не сплошного льда. При движении в сплошном льду эта составляющая, обусловленная взаимодействием кормовых и частично бортовых элементов ГО со льдом, не велика. Поэтому ей в данном подходе будем пренебрегать. Сопротивление воды при движении ЛПВП определим по данным [8], полученным по результатам модельных испытаний в чистой воде. Для глубокой воды:

$$R_B = 0,32 Fr_V^{2,5} \left(L_{ВП} / B_{ВП} \right)^{-0,4} \quad (13)$$

где $Fr_V = \frac{v}{\sqrt{g^3 \frac{D}{\rho_B}}}$ – число Фруда по водоизмещению.

Таким образом, полное сопротивление при движении ЛПВП в сплошном ледяном поле запишем в виде:

$$R = p_{ВП} B_{ВП} \left(\frac{P_{ВП}}{2\rho_B g} - K_W \sqrt{h} - B \frac{P_{ВП}^2}{2\rho g} + f \frac{P_{ВП}^2 B}{\rho_B g \sin \gamma} + 0,32 Fr_V^{2,5} (L/B)^{-0,4} \right) \quad (14)$$

При использовании зависимости (14) предполагалось, что скорости движения не велики, поэтому сопротивление от разрушения льда и трения ГО о лёд считаем не зависимыми от скорости. Полную буксировочную мощность на подъем и движение ЛПВП во льдах представим в виде

$$N_\Sigma = \frac{\frac{K_p h^2}{r^2} (1 + \frac{r^2}{S_{ВП}}) n h_\Sigma \sqrt{\frac{2P_{ВП}}{\rho_{воды}}}}{\eta_B} + [P_{ВП} B_{ВП} \left(\frac{P_{ВП}}{2\rho_B g} - K_W \sqrt{h} \right) - B \frac{P_{ВП}^2}{2\rho g} + f \frac{P_{ВП}^2 B}{\rho_B g \sin \gamma} + 0,32 Fr_V^{2,5} (L/B)^{-0,4}] v \quad (15)$$

При определении ширины ледового канала B_K можно руководствоваться максимальной шириной проводимых транспортных судов и иметь в виду $B_K \approx 1,1 B_{ВП}$. Анализ приведенных зависимостей показывает, что суммарная мощность, необходимая для подъема и движения ЛПВП определяется следующими параметрами:

$$N_\Sigma = f \left(S_{ВП}, B_{ВП}, L_{ВП} / B_{ВП}, v, h_{ГО}, P_{ВП}, Q, h \right) \quad (16)$$

Толщина льда, как правило, определяется техническим заданием, как и ширина ВП, связанная с шириной канала. Высота парения может быть определена следующим образом:

$$h_{ГО} = h + h_T + \Delta h \quad (17)$$

где h_T – возможная высота торосов, м;

Δh - запас ($\Delta h \approx 0,1 \div 0,2 \text{ м}$)

Скорость движения состава с ЛПВП определяется мощностью толкающего судна и поэтому является относительно независимым параметром.

Условие $N_\Sigma \rightarrow N_{min}$ можно выполнить, приравнявая нулю полный дифференциал функции N_Σ

$$\frac{dN_\Sigma}{dS_{ВП}} = 0; \quad \frac{dN_\Sigma}{d(L_{ВП} / B_{ВП})} = 0; \quad \frac{dN_\Sigma}{dv} = 0 \quad (18)$$

Поставленную задачу можно решать как систему уравнений (18) или графическим способом. Уравнение масс в начальной стадии проектирования можно записать так [5],

$$D = P_{\text{ВП}} S_{\text{ВП}} = \sum_i m_i(S_{\text{ВП}}) + m_6 \quad (19)$$

где $\sum_i m_i(S_{\text{ВП}})$ – сумма масс, составляющих нагрузку судна;

m_6 - масса переменного балласта, необходимого для увеличения давления в ВП при разрушении льда значительных толщин.

Один из важных вопросов, связанных с проектированием СВП и, в частности, ЛПВП, является обеспечение устойчивости при выходе и парении на ВП. Во многих случаях [9] и др. превалирует мнение, что при камерной схеме формирование ВП с сегментным гибким ограждением устойчивостью без секционирования обеспечить нельзя. Однако секционирование воздушной подушки при эксплуатации судна в ледовых условиях не целесообразно. Для ЛПВП был предложен способ [2] и др. обеспечения устойчивости без секционирования ВП за счет рационального выбора формы и размеров ГО. В этом случае (рис.4) начальная устойчивость будет обеспечена до тех пор, пока ватерлиния при наклонениях не пересечет колена ГО (на рис. –ВЛ-1). В первом приближении можно принять $h_K = 2h_{\text{П}}$. Как показали модельные и натурные эксперименты [2,5] и др. угол γ целесообразно принимать $45 - 50^\circ$, угол $\alpha \approx 80 - 95^\circ$. Оценить начальную устойчивость ЛПВП можно по известной зависимости:

$$h_o = r_o + z_c - z_g \quad (20)$$

где h_o – начальная метацентрическая высота,

r_o – метацентрический радиус,

z_c, z_g – аппликаты центра величины и центра тяжести масс судна.

По предложениям [10]:

$$r_o = \frac{I_{\text{КВЛ}} - I_{\text{ВП}}}{V} \quad (21)$$

где $I_{\text{КВЛ}}, I_{\text{ВП}}$ – моменты инерции площадей КВЛ и ВП,

V – объемное водоизмещение судна (или, что тоже самое, объем воздушной впадины, $V = \frac{D}{\rho}$).

Центр величины C_o принимается в центре тяжести объема воздушной полости. Центр тяжести масс судна определяется обычным способом. Обратный завал верхней части ГО к корпусу сложился эмпирически из-за желания уменьшить ширину корпуса судна с сохранением ширины ВП. При наклонении судна в режиме парения из-за завала ГО будет уменьшаться ширина КВЛ и, соответственно r_o и h_o . Математическая модель обеспечения устойчивости включается в математическую модель судна.

В качестве примера рассмотрим выбор площади ВП, отношения L/B при разрушении ледяного покрова толщиной 0,8 м. ($S_{\text{ВП}}^{\text{opt}}, L/B^{\text{opt}}, v$).

На рис.1 показано необходимое давление и расход воздуха из ВП. Принято $L/B = m = 0,5; 1,0; 1,5$.

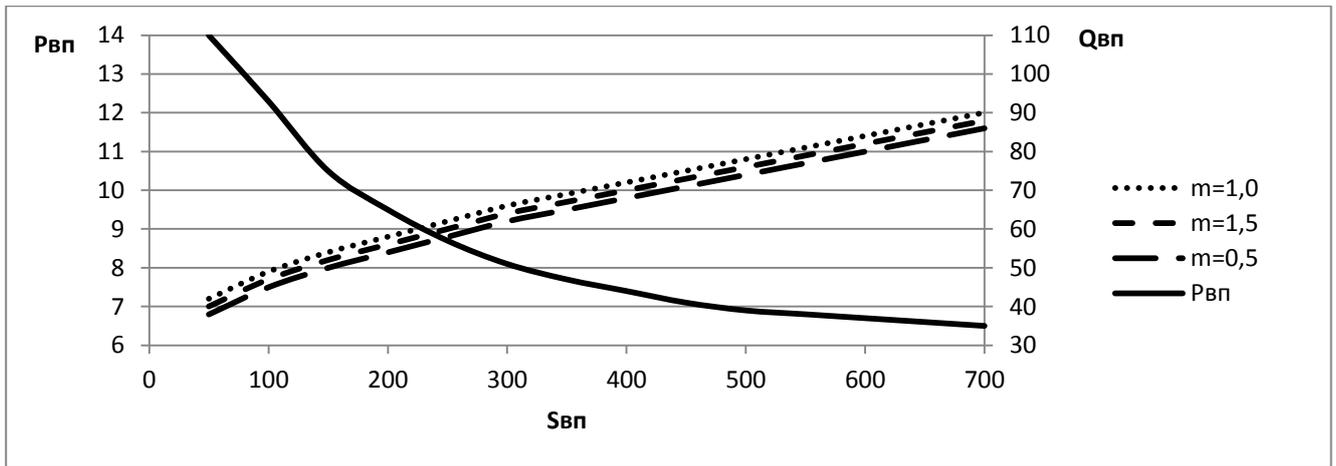


Рис.1. Необходимое давление и расход воздуха в ВП для разрушения льда толщиной 0,8 м ($P_{вп}$, кПа – необходимое давление, $Q_{вп}$, M^3/c – расход воздуха, $S_{вп}$, M^2 – площадь воздушной подушки)

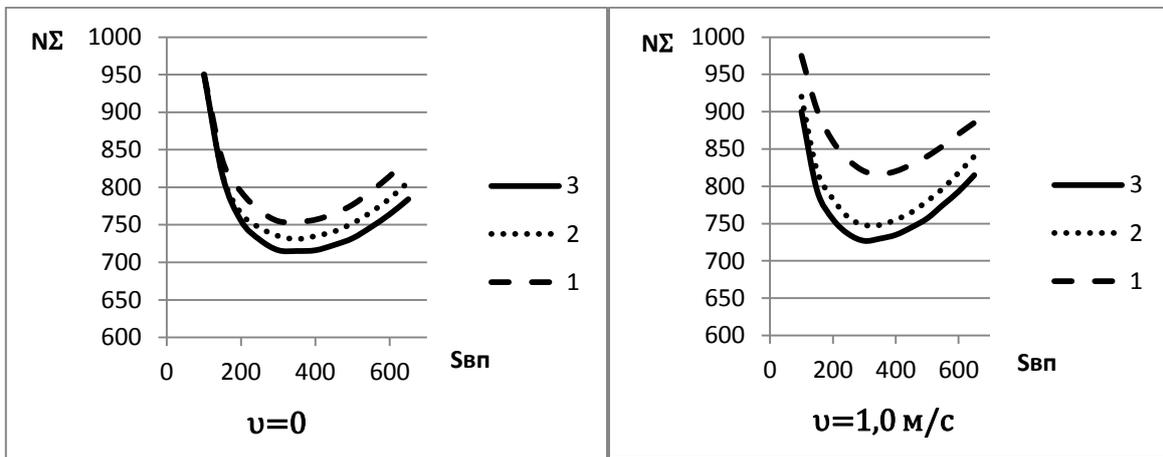


Рис.2. Суммарная мощность при разрушении льда толщиной 0,8м и движении при скорости v . (1 – $m=0,5$; 2 – $m=1,0$; 3 – $m=1,5$; N_{Σ} , кВт – суммарная мощность; $S_{ВП}$, M^2 – площадь ВП)

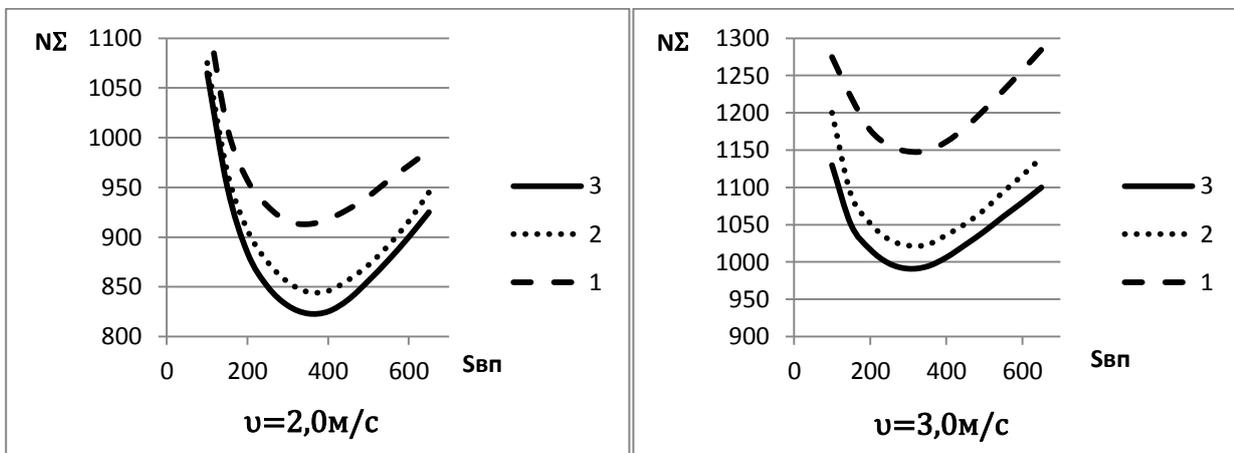


Рис.3. Суммарная мощность при разрушении льда толщиной 0,8м и движении при скорости v . (1 – $m=0,5$; 2 – $m=1,0$; 3 – $m=1,5$; N_{Σ} , кВт – суммарная мощность; $S_{ВП}$, M^2 – площадь ВП)

$S_{ВП}, \text{м}^2$ – площадь ВП)

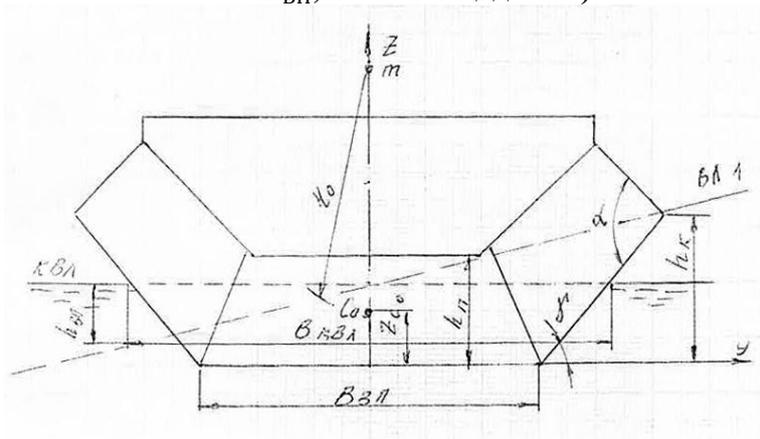


Рис. 4. К вопросу об обеспечении устойчивости ЛПВП в режиме парения

Библиографический список

1. **Гайкович, А.И.** Теория проектирования водоизмещающих кораблей и судов. Т.1[Текст] / А.И. Гайкович. – СПб.:МОРИНТЕХ, 2014. – 819с.
2. **Дехтяр, М.Б.** Оценка устойчивости платформ на воздушной подушке в переходном режиме: [Текст]/Межвуз.Сб.Горьков.политехн. ин-т. – Горький, 1986. С. 95-100.
3. **Грамузов Е.М.**Технико-экономический анализ разрушения ледяного покрова и продления навигации с использованием технологий на воздушной подушке[Текст] / Е.М. Грамузов, Ю.А. Москвичева, Е.В. Зуева // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 9.
4. **Демешко, Г.Ф.** Проектирование амфибийных судов на воздушной подушке[Текст] / Г.Ф. Демешко. – СПб: Судостроение, 1992. – 269с.
5. **Зуев, В.А.** Новые технологии разрушения ледяного покрова и продления навигации судами на воздушной подушке[Текст] // Труды ЦНИИ им.акад.А.Н. Крылова. Вопросы морской ледотехники. 2007. Вып.34(318). С 78-97
6. **Зуев, В.А.** Нагрузка масс ледокольных платформ на воздушной подушке [Текст] // Матер. научно-тех.конференции «Современные технологии в кораблестроении и в авиационном оборудовании, науке и производстве». Н.Новгород, 2009. С.134-137
7. **Ларин, А.Г.** Оценка напряженно-деформированного состояния ледяного покрова при движении над ним ледокольных платформ на воздушной подушке[Текст] / А.Г. Ларин, Ю.А. Москвичева // Современные проблемы науки и образования. 2015.
8. **Зуев, В.А.** Модельные испытания ледокольных платформ на воздушной подушке на тихой воде[Текст]/ А.А. Зуев, Н.М. Семенова // Труды Санкт-Петербургского Университета водных коммуникаций. 2012. С.125-132
9. **Кличко, В.В.**Гидроаэродинамика судов на воздушной подушке[Текст] / В.В. Кличко. т.1. Поддержание и устойчивость. – СПб., 2012. – 242 с.
10. **Двойченко, Ю.А.** Выбор формы и размеров сегментного гибкого ограждения для ледокольной платформы на воздушной подушке[Текст] / Ю.А. Двойченко, В.Ф. Кулепов// Учетные записки Комсомольск-на-Амуре государственного технического университета. «Наукиоприродетехнике». 2014. №IV – 1(20). С.83-89.