

УДК 629.124.791.2.039

В.А. Зуев, Н.М. Семенова

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПЛАТФОРМ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ В ПОЛЕ МЕЛКОБИТОГО ЛЬДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена задача взаимодействия платформы на воздушной подушке с битым льдом. Приведены результаты модельных испытаний в шуге.

Ключевые слова: ледовые условия, сопротивление, битые льды, ледокольное судно на воздушной подушке, физико-механические характеристики.

Рассмотрим движение платформы на воздушной подушке (ПВП) в мелкодисперсном слое битого льда (шуге). В таком слое, состоящим из уплотненного снега и мелкобитого льда, распором льдин, связанных с их поворотом и другими аналогичными взаимодействиями, можно пренебречь.

Будем рассматривать плоскую задачу о взаимодействии плоского контура, составленную из носовой и кормовой поверхности гибкого ограждения (ГО) и подкупольного пространства с битым льдом. Будем полагать, что даже при весьма низких скоростях движения контура происходит отрыв слоя битого льда от кормовой поверхности ГО. Это подтверждается многочисленными экспериментами и обусловлено малыми скоростями всплытия притопленных льдин. Так, даже без учета сопротивления и присоединенных масс период свободных вертикальных колебаний льдин достаточно велик ($T = 2\pi\sqrt{\rho_{\text{л}}h/\rho_{\text{в}}g}$), и составляет (0,85-1,9) с при толщинах льда (0,2-1,0) м.

При взаимодействии ГО со льдом возможны несколько случаев. Рассмотрим лишь два граничных из них. Первый, показанный на рис. 1, а соответствует обтеканию ГО ПВП, второй (рис. 1, б) соответствует подгибанию (слому) ГО. Пренебрегая гибкостью материала ГО можно считать, что давление льда на ГО в первом случае не превышает давления в ВП, во втором превышает. В частности, при весьма низкой скорости движения, когда динамической составляющей давления можно пренебречь, получим условие, при котором реализуется первый случай:

$$P_{\text{ВП}} > (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{л}})gh, \quad (1)$$

где $P_{\text{ВП}}$ - давление в ВП.

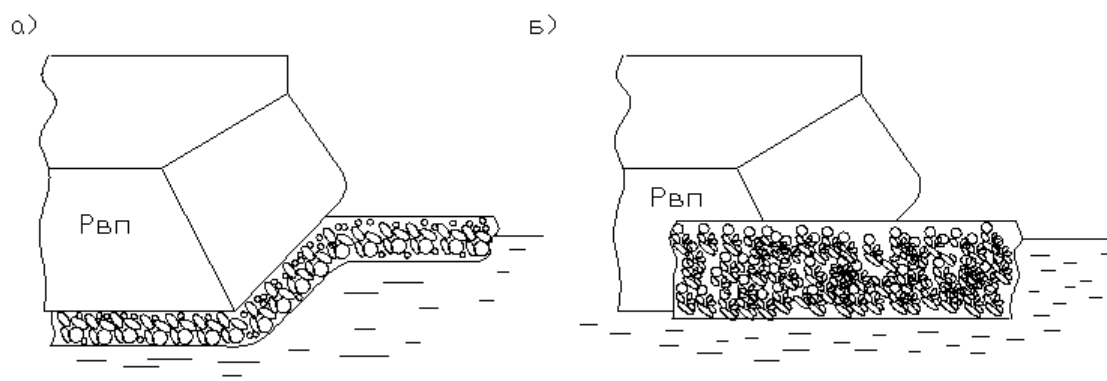


Рис. 1. К схеме взаимодействия ПВП со льдом

Рассмотрим последовательно оба случая взаимодействия ПВП со льдом.

В первом (рис. 2) полное сопротивление ПВП можно представить в виде:

$$R = R_{ст} + R_{д}, \quad (2)$$

где $R_{ст}$ - статическая составляющая сопротивления, обусловленная притапливанием частиц льда, имеющих избыточную плавучесть, и трением частиц и гибкое ограждение (ГО); $R_{д}$ - динамическая составляющая сопротивления.

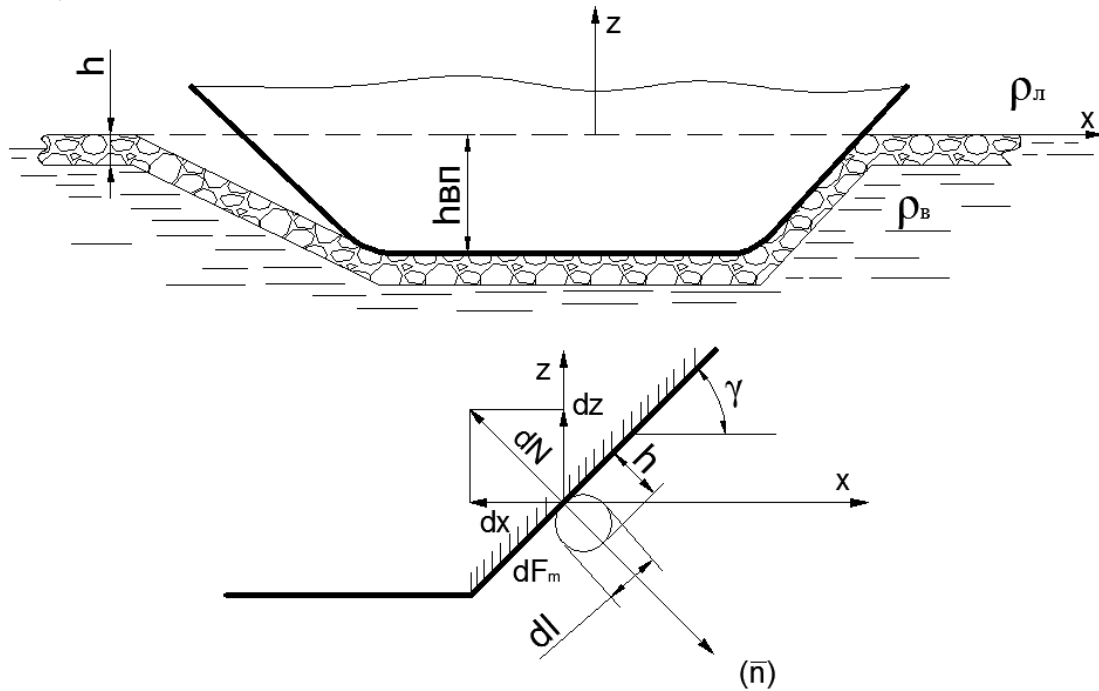


Рис. 2. Взаимодействие ПВП с битым льдом

Статическую составляющую сопротивления представим из двух частей, связанных взаимодействием носовой и боковой ветвями ГО.

Для носовой поверхности вертикальная составляющая запишется в виде:

$$Z = \int_{B_{ВП}} \int_0^{h_{ВП}} \frac{(\rho_{\sigma} - \rho_{л})gkh}{\sin \gamma} dz dy, \quad (3)$$

где $\gamma(Z)$ угол наклона ГО к горизонту; y, z – координаты; k – коэффициент упаковки гранул (мелкобитого льда); $h_{ВП} = \frac{P_{ВП}}{\rho_{\sigma}g}$ – глубина воздушной впадины.

Если носовая поверхность ГО, взаимодействующая со льдом, плоская и форма ВП в плане прямоугольная, то получим

$$Z = \frac{(\rho_{\sigma} - \rho_{л})}{\rho_{\sigma}} \cdot \frac{khP_{ВП}B_{ВП}}{\sin \gamma}. \quad (4)$$

Горизонтальная составляющая

$$X = z \operatorname{tg} \gamma. \quad (5)$$

Нормальная сила

$$N = z / \cos \gamma. \quad (6)$$

Сила трения битого льда о поверхность ГО:

$$F = fN = fz / \cos \gamma, \quad (7)$$

где f – коэффициент трения материала ГО о лед (или материал его имитирующий);

$$R'_{ст} = X + F \cos \gamma = z(\operatorname{tg} \gamma + f), \quad (8)$$

где z определяется выражением (3) или (4).

Кроме этого, происходит взаимодействие обломков с боковыми элементами ГО, что приводит к дополнительному сопротивлению трения. По аналогии с предыдущим получим

$$R''_{ст} = \frac{2f(\rho_6 - \rho_l)P_{ВП} \cdot khL_{ВП} \operatorname{ctg} \gamma}{\rho_l \cos \gamma}. \quad (9)$$

В последнем выражении учтено, что на боковые элементы ГО воздействует и битый лед, не попавший в подкупольное пространство из-за сужения ГО к низу.

Полное статическое сопротивление:

$$R_{ст} = R'_{ст} + R''_{ст}. \quad (10)$$

При определении динамической составляющей сопротивления используем приведенные ранее допущения.

При оценке динамической составляющей сопротивления считаем, что ПВП перемещается над однородным слоем мелкобитого льда постоянной толщины h и плотностью ρ_l . При контакте с ГО частицы льда получают в направлении оси Z скорость (рис. 2):

$$v_z = v \operatorname{tg} \gamma, \quad (11)$$

т.е. на элемент льда действует импульс, сообщающий ему поступательное движение в вертикальном направлении.

Очевидно,

$$z_g dt = -dm v_z, \quad (12)$$

где z_g - продольная составляющая; $dm = \rho_l h k dx$; dx – протяженность элемента льда

Отсюда, подставляя, получим

$$z_g = -\rho_l h v^2 k \operatorname{tg} \gamma. \quad (13)$$

Нормальная сила определится выражением

$$N_g = \frac{z_g}{\cos \gamma} = \frac{-\rho_l h v^2 k \operatorname{tg} \gamma}{\cos \gamma}, \quad (14)$$

сила трения от динамических давлений

$$F = f N_g = \frac{-\rho_l h v^2 k \operatorname{tg} \gamma}{\cos \gamma}, \quad (15)$$

динамическая составляющая сопротивления

$$R_g = -(z_g \operatorname{tg} \gamma + f z_g) = -\rho_l h v^2 \operatorname{tg} \gamma (f + \operatorname{tg} \gamma) k. \quad (16)$$

Если наклонная (контактирующая со льдом поверхность) ГО плоская, то дополнительных (к рассмотренным) сил взаимодействия из-за ускоренного движения льда по криволинейной поверхности не возникает ($y'' = 0$).

Ввиду малости скоростей ($Fr < 0,20$), остальными составляющими сопротивления пренебрегаем.

Для проверки адекватности математической модели были проведены специальные опыты в битом льду, представляющим собой гранулы полиэтилена диаметром 4 мм.

В опытовом бассейне поверхность воды покрывалась слоем гранул полиэтилена высокого давления, образующем средние толщины 12, 16, 20, 32 мм. В таких льдах испытывалась модель ПВП с характеристиками ($l_{ВП} \times b_{ВП}$):

- размеры ВП в плане ($l_{ВП} \times b_{ВП}$) = 0,82 × 0,73 м,
- угол наклона ГО $\gamma = 45^\circ$,
- расход воздуха $Q = 0,033 \text{ м}^3/\text{с}$,
- масса модели $m = 15,0; 20,0; 25,0 \text{ кг}$.

Среднее значение коэффициента установки $\kappa = 0,70$.

На рис. 3 и 4 приведены результаты испытаний модели ПВП.

Сплошными линиями показаны результаты расчетов по проведенным ранее зависимостям (10) и (16). Коэффициент трения принимался $f = 920 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Сравнение показывает удовлетворительную сходимость результатов и возможность использования математических моделей сопротивления при относительных скоростях $Fr < 0,20$.

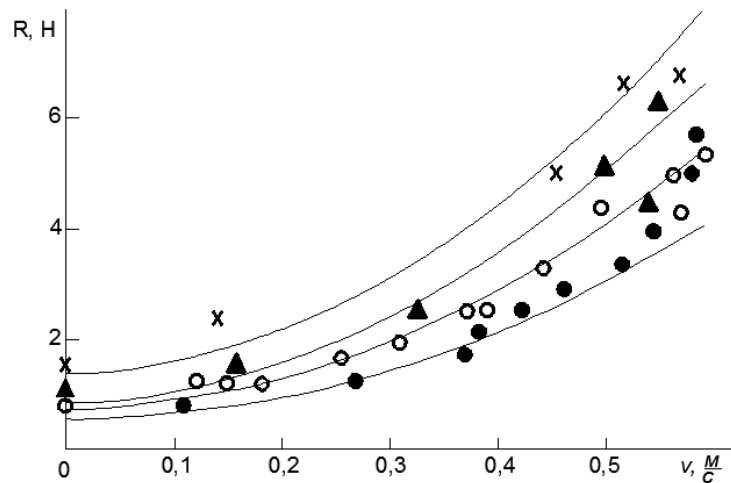


Рис. 3. Кривые сопротивления модели в гранулированном льду (шуге), масса модели 20 кг, толщина льда (• - $h = 1,2 \text{ см}$, ○ - $h = 1,6 \text{ см}$, ▲ - $h = 2,0 \text{ см}$, × - $h = 3,2 \text{ см}$)

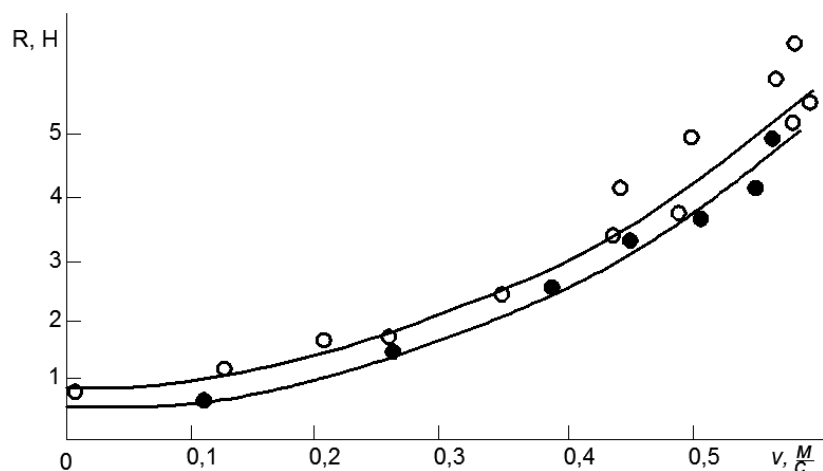


Рис. 4. Кривые сопротивления моделей ПВП массой 25 кг (○), 15 кг (•) в гранулированном льду толщиной $h = 1,6 \text{ см}$

Сопротивление, физическая модель которого представлена на рис. 1, б оценивается следующим образом (плоская задача).

Рассмотрим движение над поверхностью льда плоского контура. Выделим на контуре элементарную площадку (рис. 5) dS , избыточное давление на которой P_{BII} , внешняя нормаль \vec{n} и радиус вектор \vec{r} . Элементарная сила и момент, действующие на площадку, запишутся так:

$$\begin{aligned} d\vec{R} &= \vec{P}_n \times dS = -P_{BII} \vec{n} dS, \\ d\vec{M} &= \vec{r} \times d\vec{R} = -\vec{r} \times \vec{n} P_{BII} dS. \end{aligned} \quad (17)$$

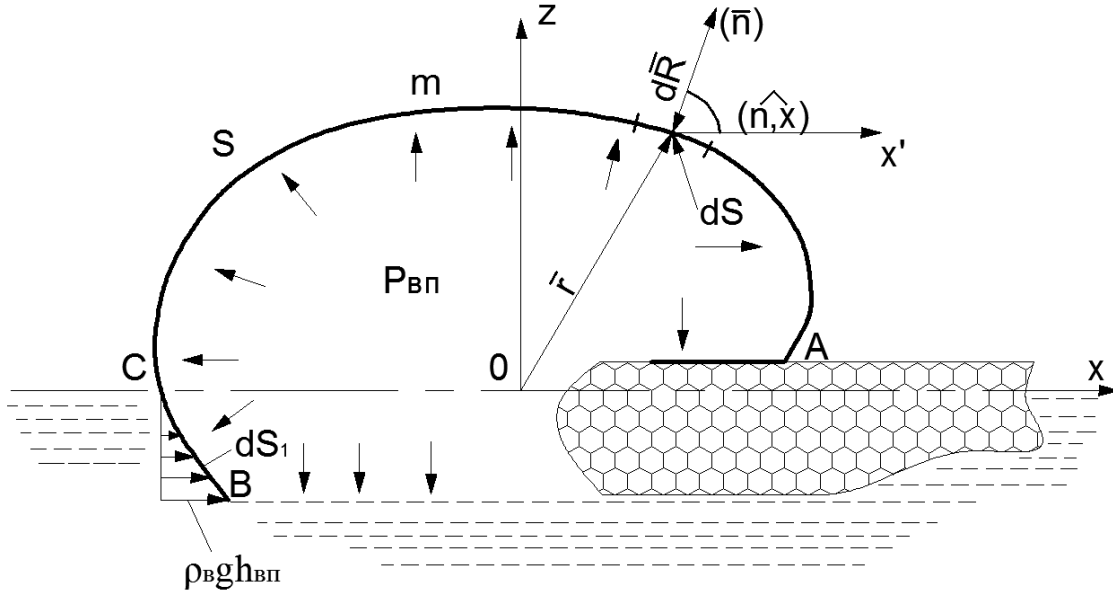


Рис. 5. Схема определения сопротивления

Учитывая результирующую от избыточных давлений, получим

$$\begin{aligned} \vec{R} &= \vec{i} \cdot R_x + \vec{K} R_z = i \int_S P_{BII} \cos(n \wedge x) dS + i \int_{S_1} \rho_e g z \cos(n \wedge x) dS_1 + \\ &+ \vec{K} \int_S P_{BII} \cos(n \wedge x) dS + \vec{K} \int_{S_1} P_{BII} \cos(n \wedge x) dS_1, \end{aligned}$$

где S – поверхность контура вдоль образующей AmB ; S_1 – поверхность контура вдоль образующей CB .

Окончательно

$$R_1 = P_{BII} \int_S \cos(n \wedge x) dS + \rho_e g \int_{S_1} z \cos(n \wedge x) dS_1 \quad (18)$$

или, учитывая, что $dS \cos(n \wedge x) = dS_x$ получим

$$R_1 = P_{BII} \int_{S_x} dS_x - \rho_e g \int_{S_{x_1}} z dS_{x_1}, \quad (19)$$

где $\int_{S_{x_1}} z dS_{x_1}$ – статический момент поверхности S_{x_1} , равный $S_1 z_{cx}$.

Поскольку $h_{ВП} = \frac{P_{ВП}}{\rho_e g}$, то

$$z_{cx} = \frac{P_{ВП}}{2\rho_e g};$$

$$R_1 = P_{ВП} B_{ВП} (z_B - z_A) - B_{ВП} \frac{P_{ВП}^2}{2\rho_e g}. \quad (20)$$

Таким образом, сопротивление, связанное с взаимодействием носовой поверхности ГО с битым льдом при наплывании на него, зависит только от давления в ВП, толщины льда и разности аппликат точек A и B .

Кроме этого, возникает сопротивление трения ГО и поверхность льда, которое приближенно можно определить так:

$$R_2 = f \frac{P_{ВП} B_{ВП} h}{\sin \gamma}. \quad (21)$$

Библиографический список

1. Зуев, В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – СПб.: Судостроение, 1986. – 208 с.
2. Зуев, В.А. Новые технологии разрушения ледяного покрова и продления навигации судами на воздушной подушке // Вопросы морской ледотехники: тр. ЦНИИ им. Акад. А.М. Крылова. 2007. Вып. 34 (318) С. 778–96.
3. Кличко, В.В. Гидродинамика амфибийных судов на воздушной подушке / В.В. Кличко. – СПб., 2012.

Дата поступления
в редакцию 18.06.2013

V.A. Zuev, N.M. Semenova

RESISTANCE FORECASTING OF ICE-BREAKING AIR CUSHION PLATFORM IN SLUDGE ICE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The interaction problem of icebreaking air cushion platform in sludge ice is considered.

Design/methodology/approach: A theoretical framework is proposed based on mathematic simulation with an analysis of the physical processes that influence on the platform overall resistance. The model data presented in this research paper show the adequacy of the chosen model.

Findings: This available data can be applied in resistance forecasting of the ice-breaking air cushion platform to movement in broken ice in a first approximation.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research to know how such characteristics influence the resistance when icebreaking platform to movement in sludge ice.

Originality/value: For solving the optimal design problem of the air cushion platform is essential to know the resistance of the ship to movement both in clear water and ice. For the ice-breaking hovercrafts this problem consists of three tasks: defining ice-breaking resistance, defining resistance the air cushion platform which operates in the broken ice and defining water resistance. And this method presented could be useful for calculating resistance of icebreaking platform to movement at earlier stages of icebreaking air cushion platform design.

Key words: ice conditions, resistance, broken ice, icebreaking air cushion vehicles, physical and mechanical characteristics.