

УДК 629.124.791.2.039

В.А. Зуев¹, Н.М. Семенова¹, В.А. Кравченко²

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛЕДОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛЕДОКОЛЬНОЙ ПЛАТФОРМЫ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ В МЕЛКОБИТЫХ ЛЬДАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «КИТ»²

Приводятся результаты модельных исследований ледокольной платформы на воздушной подушке в мелкобитых льдах. Анализируется влияние давления в воздушной подушке, расхода воздуха, сплоченности битого льда и соотношения длины воздушной подушки к ширине на сопротивление. Приводятся аппроксимирующие зависимости.

Ключевые слова: лед, ледокольная платформа на воздушной подушке, сопротивление, экспериментальные исследования.

Оценка сопротивления платформы на воздушной подушке (ПВП) в мелкобитом льду не менее затруднительная, чем в чистой воде. Это связано как с нестабильностью физико-механических и геометрических параметров льда [1], так и со стохастическим характером взаимодействия льдин с гибким ограждением (ГО). В этих условиях для прогнозирования сопротивления наиболее надежен способ испытания моделей в бассейнах с моделирующим ледовым покрытием и последующим пересчетом результатов на натуре.

Сопротивление ПВП в мелкобитом льду представим следующим образом:

$$R = R_{\text{ст}} + R_{\text{д}}. \quad (1)$$

Можно полагать, что статическая составляющая сопротивления $R_{\text{ст}}$ зависит от давления в воздушной подушке (ВП) и трения материала ГО о поверхность льда, а также от толщины и протяженности льда и не зависит от скорости. Динамическая составляющая $R_{\text{д}}$, к которой отнесем и сопротивление воды, обусловлена скоростным воздействием битого льда на ПВП [2].

Составляющие сопротивления приведены на рис. 1.

Скорость движения ледокольной платформы на воздушной подушке (ЛПВП) не велика (до 12 км/ч), поэтому остальными составляющими ввиду их малости можно пренебречь.

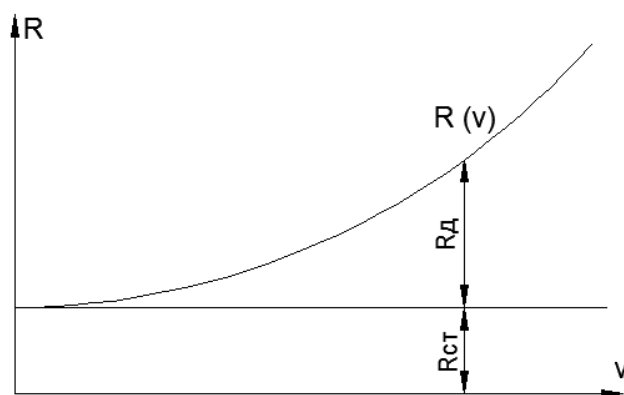


Рис. 1. Составляющие сопротивления:

$R(v)$ – сопротивление ПВП в битом льду; v – скорость ПВП;

$R_{\text{ст}}$ – статическая составляющая сопротивления; $R_{\text{д}}$ – динамическая составляющая сопротивления

Испытания в битом льду проводились в ледовом бассейне Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (НГТУ) в среде плиток из полиэтилена высокого давления, покрывающих свободную поверхность воды. Под мелкобитым льдом понимаются обломки, полученные, например, после движения ледокола, когда происходит разрушение ледяного покрова (в основном от изгиба) и размеры льдин не превышают 4÷5 толщин.

Анализ природы действующих на ЛПВП сил при движении в мелкобитом льду и условий их подобия позволяет установить:

$$Fr = idem; \quad \frac{\rho_{\text{л}}}{\rho_{\text{в}}} = idem; \quad f = idem, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{л}}$, $\rho_{\text{в}}$ – плотность льда и воды; f – коэффициент трения материала ГО о модель льда,

$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$ – число Фруда; v – скорость движения; L – длина судна по воздушной подушке;

g – ускорение свободного падения.

Плотность полиэтилена высокого давления $\rho_{\text{л}}=0,92$ т/м³, коэффициент трения о поверхность ГО $f=0,20 \div 0,22$, что соответствует условиям (2).

При выполнении этих условий ледовое сопротивление можно определить по закону подобия Фруда (силы по куду линейного масштаба, скорости по корню квадратному из линейного масштаба).

Однако на практике моделирование движения в битых льдах встречает известные трудности [2]. Большое разнообразие ледовых условий, нестабильность свойств и характеристик битых льдов делают невозможным достаточно точно и определённо зафиксировать многочисленные параметры, характеризующие натурную ледовую обстановку. Вследствие этого не удастся выполнить все условия подобия при моделировании ледовой среды. По этим причинам, а также из-за необходимости обеспечить повторяемость среды в процессе эксперимента приближенно моделируется движение судна в некоторой условной среде с определенными характеристиками. При этом условия подобия соблюдаются лишь в отношении наиболее важных параметров битого льда: толщины и протяженности льдин, сплоченности и ширины канала битого льда, плотности и коэффициента трения материала, имитирующего битый лед о поверхность ГО. Форма отдельных льдин [2] практически не влияет на ледовое сопротивление при данной сплоченности, толщине и протяженности льдин. Это позволяет моделировать битый лед с помощью пластинок одинаковой правильной формы.

При испытаниях моделей варьировались: давление в ВП ($P_{\text{ВП}}$); толщина льда (h); протяженность льдин ($l=4h$); расход воздуха из ВП (Q); сплоченность битого льда (\bar{S}). Эти испытания проводились с моделью №1 (базовой)

Для оценки влияния длины ВП $L_{\text{ВП}}$ к ширине $B_{\text{ВП}}$ проводились испытания моделей №2, 3, 4. Эти испытания проходили только в воде. Характеристики моделей приведены в табл. 1. Фрагмент испытания модели приведен на рис. 2.

Таблица 1

Главные размерения моделей ЛПВП

Номер модели	Длина ВП $L_{\text{ВП}}$, м	Ширина ВП $B_{\text{ВП}}$, м	Высота бор-та H , м	L/B	Высота ГО, м
1	0,80	0,70	0,10	1,14	0,060
2	0,366	0,366	0,045	1,0	0,045
3	0,359	0,366	0,045	1,52	0,045
4	0,366	0,559	0,045	0,65	0,045



Рис. 2. Фрагмент испытания ЛПВП в чистой воде

Сопротивление ЛПВП можно представить в виде:

$$R = f \left(P_{вп}, S_{вп}, \rho_{л}, \rho_{в}, Q, v, s, h, \frac{L_{вп}}{B_{вп}} \right), \quad (3)$$

где $P_{вп}$ – давление в ВП; $S_{вп}$ – площадь ВП; $\rho_{л}$, $\rho_{в}$ – плотность льда и воды; Q – расход воздуха из ВП; v – скорость движения; h – толщина льда; S – функция сплоченности льда ($\bar{S} = 0; 0,1; 0,2; \dots 1,0$).

В безразмерной комбинации (3) можно переписать так:

$$\frac{R}{P_{вп} \cdot S_{вп}} = \prod_{i=1}^k f_i^{m_i}, \quad (4)$$

где $f_i^{m_i}$ – безразмерные комплексы, составленные из определяющих параметров, соответствующих процессу взаимодействия ЛПВП с окружающей средой. Предполагается, что эти параметры можно считать взаимонезависимыми [3].

Комбинацию этих параметров можно записать в виде:

$$\frac{R}{P_{вп} \cdot S_{вп}} = f_1(Fr_V)^{m_1} \cdot f_2(\bar{q})^{m_2} \cdot f_3(h)^{m_3} \cdot f_4(\bar{S}) \cdot f_5 \left(\frac{L_{вп}}{B_{вп}} \right)^{m_5}, \quad (5)$$

где Fr_V – число Фруда по объемному водоизмещению, определяется по формуле:

$$Fr_V = \frac{v}{\sqrt{g \cdot 3 \frac{m}{\rho_{в}}}}, \quad (6)$$

где m – масса модели; \bar{q} – безразмерный расход, определяемый как:

$$\bar{q} = \frac{Q}{S_{вп}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_{вп}}{\rho_{возд}}}, \quad (7)$$

где $\rho_{возд}$ – плотность воздуха

Задачей эксперимента было оценить функции $f_i^{m_i}$

Особенностью ЛПВП являются низкие скорости движения и относительно малые расходы воздуха [4]. Поэтому приближенно можно считать, что нижняя кромка ГО совпадает с

дном воздушной впадины $h_{ВП}$ ($h_{ВП} = \frac{P_{ВП}}{\rho_{в} \cdot g}$).

На рис. 3 приведены экспериментальные точки сопротивления модели №1 в сплоченном битом льду ($\bar{s}=1,0$) толщиной 20мм и размерами плиток в плане 80x80мм при разных давлениях и расходе воздуха $Q=0,028\text{м}^3/\text{с}$.

Представим сопротивление в виде суммы статической и динамической составляющей (1). Статическую составляющую (при $v \rightarrow 0$) можно аппроксимировать зависимостью:

$$R_{ст} = f_1' \cdot P_{вп} \cdot S_{вп}, \tag{8}$$

где $f_1' = 0,020$ – эмпирический коэффициент.

Используя графики рис. 3, безразмерную величину динамической составляющей f_1'' можно аппроксимировать в виде:

$$f_1'' = \frac{m}{\rho_{в} \cdot B_{вп} \cdot S_{вп}}; \tag{9}$$

$$f_1'' = 8,45 \cdot Fr_V^{1,4}. \tag{10}$$

Таким образом, безразмерный параметр f_1 определится так:

$$f_1 = (f_1' + f_1'') = (0,020 + 8,45 \cdot Fr_V^{1,4}) \pm 0,04. \tag{11}$$

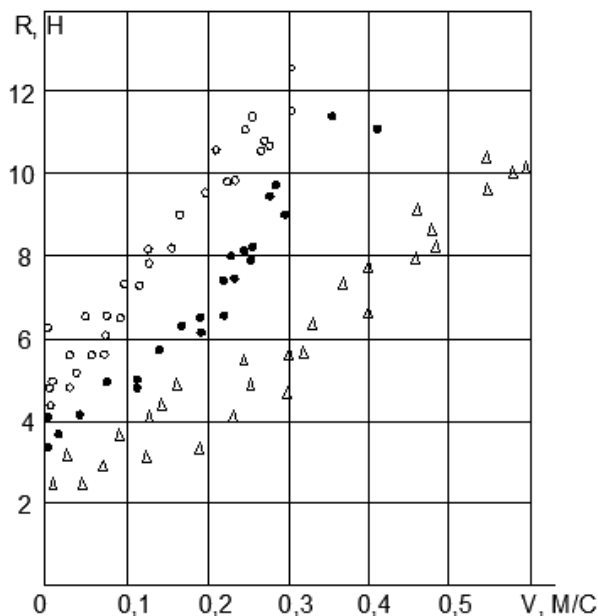


Рис. 3. Сопротивление модели в битом льду 10-балльной сплоченности:

○ - $P_{ВП} = 438\text{Па}$; ● - $P_{ВП} = 350\text{Па}$; Δ - $P_{ВП} = 263\text{Па}$

Зависимость $f_1(Fr_V)$ при расходе $Q=0,028\text{ м}^3/\text{с}$ от числа Фруда приведена на рис. 4.

Для оценки влияния расхода были проведены испытания модели в поле битого льда десятибалльной сплоченности при безразмерных расходах, равных 0,0024; 0,0029; 0,0033. Результаты испытаний приведены на рис. 5.

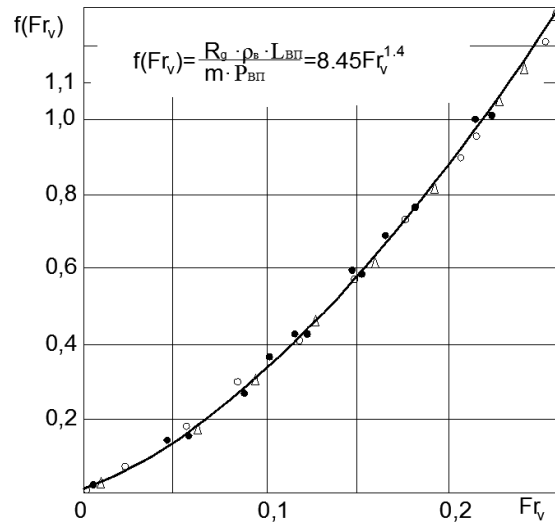


Рис. 4. Безразмерная составляющая сопротивления в битом льду:
 ○ - $P_{ВП} = 438 \text{ Па}$; ● - $P_{ВП} = 350 \text{ Па}$; △ - $P_{ВП} = 263 \text{ Па}$

Безразмерную функцию $f_2\left(\bar{q}\right)$ для приближенной оценки влияния расхода на сопротивление можно аппроксимировать функцией:

$$f_2\left(\bar{q}\right) = 1.38 - 131 \cdot \bar{q} \pm 0.06 \cdot \bar{q} \quad (12)$$

Функция справедлива в диапазоне $0,0024 \leq \bar{q} \leq 0,0038$.

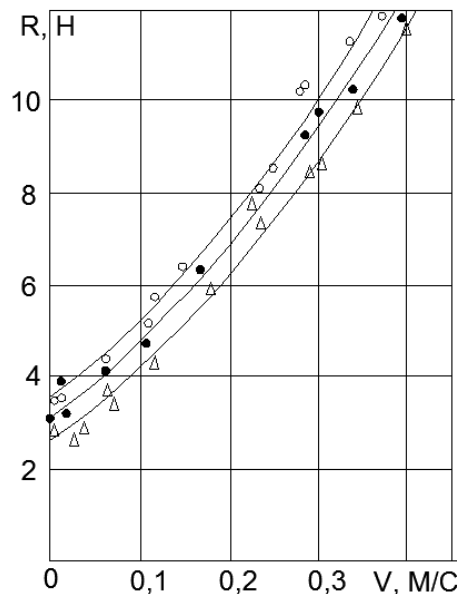


Рис. 5. Зависимость сопротивления ЛПВП (массой 20 кг) от расхода в поле битого сплоченного льда:
 ○ - $\bar{q} = 0.0024$; ● - $\bar{q} = 0.0028$; △ - $\bar{q} = 0.0034$

Результаты испытаний приведены на рис. 6.

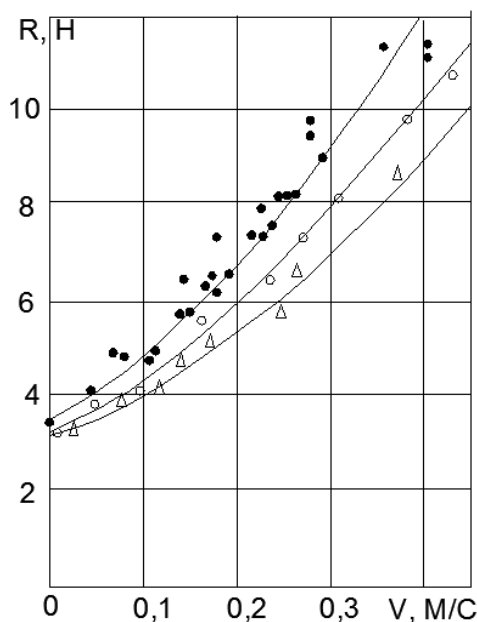


Рис. 6. Сопротивление модели ПВП массой 20кг в сплоченном битом льду:
 • - толщина льда =20 мм; ○ - толщина льда =16 мм; Δ - толщина льда =12 мм

Обработка результатов для безразмерного параметра $f_3\left(\frac{-}{h}\right)$ привела к результатам:

$$f_3\left(\frac{-}{h}\right) = 1,28 \cdot \frac{-}{h} \pm 0,05, \tag{13}$$

где $\frac{-}{h} = \frac{h \cdot \rho_{\text{л}} \cdot g}{P_{\text{вп}}}$, $0 < h \leq 0,9$.

Для оценки влияния сплоченности битого льда на сопротивление были проведены испытания модели №1 массой 20 и 25кг в битом льду сплоченностью 10,8,6 и 4 балла (соответственно функции сплоченности $\frac{-}{s} = 1.0; 0.8; 0.6$ и $0,4$). Результаты испытаний приведены на рис. 7.

Необходимо отметить, что при малых скоростях движения модели к полученным результатам надо относиться осторожно. Видимо, из-за значительного трения о лед и малого сопротивления обломков при низких скоростях происходило их вовлечение (из-за касательных сил) в движение вместе с моделью. Это относится к движению в разреженных льдах. При скоростях $Fr_V > 0.05$ этого явления не наблюдалось.

Влияние сплоченности льда на сопротивление выявить сложнее в силу отмеченных обстоятельств и стохастического характера взаимодействия. Анализ показывает, что приближенно можно записать:

$$f_4\left(\frac{-}{s}\right) = \frac{\left(\frac{-}{s}\right)^{0.75}}{2 - s} \pm 0.05. \tag{14}$$

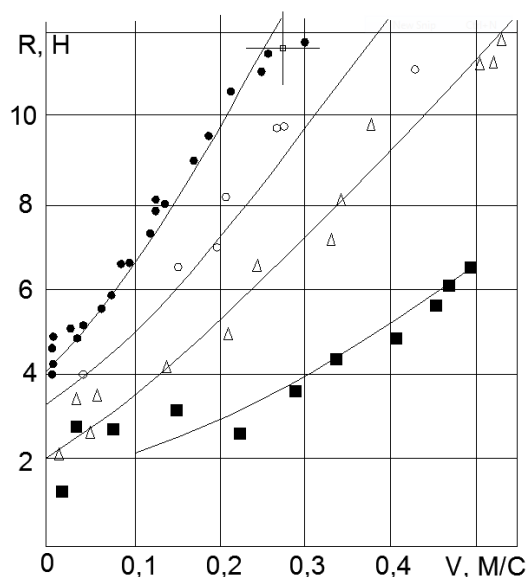


Рис. 7. Сопротивление модели в поле битого льда. Масса модели 25 кг:

- - сплоченность = 10 баллов; ○ - сплоченность = 8 баллов; Δ - сплоченность = 6 баллов;
- - сплоченность = 4 балла

На рис. 8 приведена безразмерная функция $f_4\left(\frac{-}{s}\right)$.

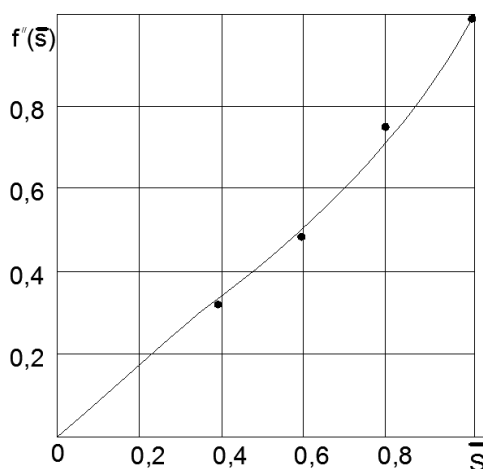


Рис. 8. Зависимость функции $f_4\left(\frac{-}{s}\right)$ от сплоченности льда:

- - эксперимент; — - аппроксимация

В опытах с моделями №2, 3, 4 исследовалось влияние отношения $L_{вп}/B_{вп}$ на сопротивление моделей. Эти отношения находились в пределах $0,65 \leq L_{вп}/B_{вп} \leq 1,52$. Испытания проводились на чистой воде [6]. При этом имелось в виду, что отношение $L_{вп}/B_{вп}$ при движении в мелкобитом льду и в воде будут одинаково влиять на сопротивление.

Кривые сопротивления приведены на рис. 9. Безразмерный параметр $f_5(L_{вп}/B_{вп})$ получен в виде:

$$f_5\left(\frac{L}{B}\right) = 1,27 - 0,27 \cdot \left(\frac{L}{B}\right) \pm 0,01. \quad (15)$$

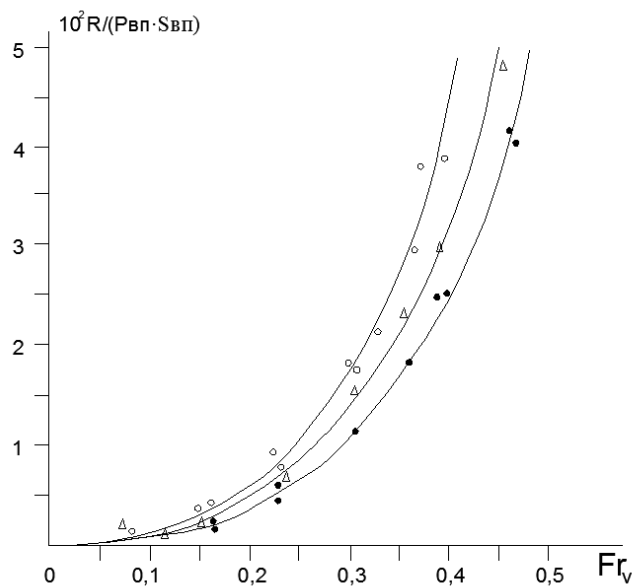


Рис. 9. Зависимость безразмерного сопротивления модели в воде:

Δ – модель №2; \bullet – модель №3; \circ – модель №4

Данных по натурным испытаниям ПВП в битом льду чрезвычайно мало. На рис. 10 показаны результаты расчета сопротивления в битом льду ПВП «ВП-1» и данные натурных испытаний [7].

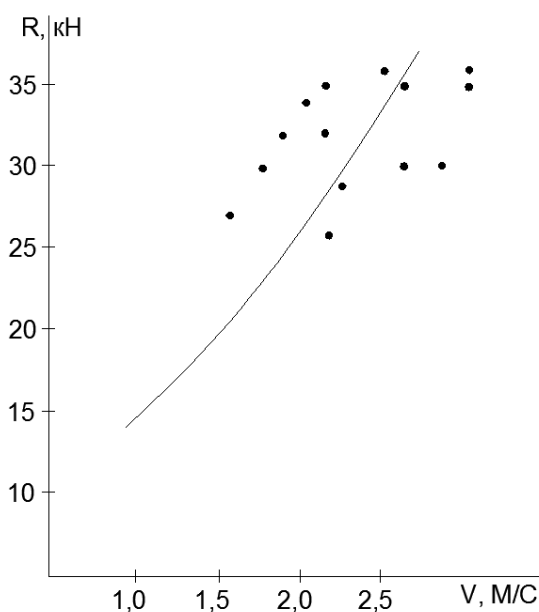


Рис. 10. Сопротивление ПВП ВП-1 в канале битого льда толщиной 0,3-0,35м ($P_{вп}=4,6\text{кПа}$, $m=61\text{т}$):

\bullet - эксперимент; — - расчет

Библиографический список

1. **Milano Y.R.** Resistance of a ship to slow continuous motion in ice when assisted by an air cushion vehicle. P. 47–94.
2. **Зуев, В.А.** Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.

3. Зуев, В.А. Новые технологии разрушения ледяного покрова и продление навигации судами на воздушной подушке // Вопросы морской ледотехники: тр. ЦНИИ им. Акад. А.Н. Крылова. Вып. 34(318). – СПб., 2007. С. 78–97.
4. Колызаев, В.А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания / В.А. Колызаев, А.И. Косоруков, В.А. Литвиенко. – Л.: Судостроение, 1980. – 472 с.
5. Кличко, В.В. Гидроаэродинамика амфибийных судов на воздушной подушке. Поддержание и остойчивость / В.В. Кличко. – СПб.: ЦНИИ им. Акад. А.Н. Крылова, 2012. Т. 1. – 242 с.
6. Зуев, В.А. Модельные испытания ледокольных платформ на воздушной подушке на тихой воде / В.А. Зуев, Н.М. Семенова // Журнал университета водных коммуникаций. – СПб.: СПГУВК, 2012. Вып. 1. С. 125–132.
7. Ледовые испытания несамоходной платформы на воздушной подушке «ВП-1» в акватории порта Турку 8.-9.3.1982. Отчет № Б-59 Vadam, Хельсинки, 1982.

*Дата поступления
в редакцию 29.11.2013*

V.A. Zuev¹, N.M. Semenova¹, V.A. Kravchenko²

EXPERIMENT RESEARCHES OF ICE-BREAKING AIR CUSHION PLATFORM ICE RESISTANCE IN BROKEN ICE

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alexeev¹,
JSC “CIT”²

Purpose: The pressure influence in the air cushion, airflow, the broken ice concentration and L/B ration on resistance are analyzed.

Design/methodology/approach: The research is based on the experimental dates are made on the basis of a full-scale model tests. 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, icebreaking air cushion platform, resistance, experimental investigation.