

УДК 629.561.5:629.576

DOI: 10.46960/2782-5477\_2022\_3\_24

Н.М. Семенова

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЛЕДОКОЛЬНЫХ ПЛАТФОРМ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ В ЧИСТОЙ ТИХОЙ ВОДЕ

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

Представлены результаты исследования, объектом которого были ледокольные платформы на воздушной подушке, отличающиеся от обычных судов на воздушной подушке низкой скоростью, высоким давлением и своей несамходностью. Проанализированы имеющиеся теоретические, эмпирические и полуэмпирические зависимости. Выявлено многообразие полученных результатов по различным формулам и сделаны выводы о сложности использования для прогнозирования сопротивления платформ аналитических зависимостей. Рассмотрены данные масштабных модельных экспериментов, учитывающих влияние взаимонезависимых компонент. Предложены полуэмпирические зависимости для расчета сопротивления ледокольных платформ на воздушной подушке при движении в чистой тихой воде. Показана адекватность и хорошая сходимость с данными натурных испытаний.

**Ключевые слова:** СВП, ледокольная платформа на воздушной подушке, чистая вода, сопротивление судна, натурный и модельный эксперименты.

Реалии современного мира влияют на важнейшие аспекты прогнозирования ледового сопротивления судов и продления навигации. Продолжающееся освоение Арктического шельфа, практически круглогодичное судоходство по Северному Морскому Пути и на внутренних водных путях – все это определяет научно-исследовательский интерес к разработке новых и модификации имеющихся средств продления навигации.

В настоящее время, наряду с использованием ледоколов, перспективным способом разрушения льда являются суда на воздушной подушке (СВП). В имеющихся исследованиях акцент сделан на разрушении льда резонансным методом, когда СВП движется по синусоидальной траектории с критической скоростью. Однако не менее актуальным является и другой способ разрушения льда – с использованием несамходных ледокольных платформ на воздушной подушке (ЛПВП). Низкоскоростным способом разрушения льда ЛПВП активно занимается кафедра «Кораблестроение и авиационная техника» Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева.

Известными особенностями ЛПВП являются низкие скорости хода до 4м/с и сравнительно высокие показатели давления в воздушной подушке (ВП) – 5-10кПа. Исходя из того, что ЛПВП являются несамходными судами, режим их движения соответствует докритическим скоростям, когда  $Fr_v$  не более 0,45. Высокие значения давления в ВП приводят к снижению мощности подъемного комплекса, что в свою очередь влечет за собой снижение расхода воздуха и уменьшению зазора нижней кромки гибкого ограждения (ГО) и уровня воды во впадине. Именно это обстоятельство позволяет приблизительно приравнять глубину погружения ГО к глубине впадины, определив ее по формуле:

$$h_{ВП} = \frac{P_{П}}{\rho g} \quad (1)$$

где  $P_{П}$  – давление в ВП,  $\rho$  – плотность воды,  $g$  – ускорение свободного падения.

Чтобы решить задачу проектирования ЛПВП оптимально, необходимо исследовать и определить не только составляющие, влияющие на разрушение льда, но и сопротивление движению воды. Известные аналитические зависимости предлагают просуммировать от-

дельные компоненты различной природы и значимости из условий состояния погоды в заданный период времени и состояния нагрузки [1].

$$R = R_a + R_{имп} + R_{ост} + R_{волн}^{доп} \quad (2)$$

где  $R_a$  – воздушное или аэродинамическое сопротивление,  $R_{имп}$  – импульсное сопротивление,  $R_{ост}$  – остаточное сопротивление,  $R_{волн}^{доп}$  – дополнительное сопротивление на волнении.

ЛПВП движется с низкими эксплуатационными скоростями, поэтому аэродинамическим сопротивлением можно пренебречь. Небольшое значение имеет и импульсное сопротивление, которое учтено в формуле лишь косвенно. Дополнительное сопротивление на волнении определяется сопротивлением ГО. Вследствие отсутствия данных по прототипу, составляющую дополнительного сопротивления на волнении можно определить через безразмерный показатель  $R_{волн}^{доп}/Dg$ . Он определяется по графику и зависит от числа Фруда и отношения расчетной высоты волны к волне гибкого ограждения. К сожалению, достоверные данные по этому показателю реализованы для чисел Фруда от 0,5, тогда как ледокольные платформы работают в диапазоне  $0 \leq Fr_L \leq 0,3$ .

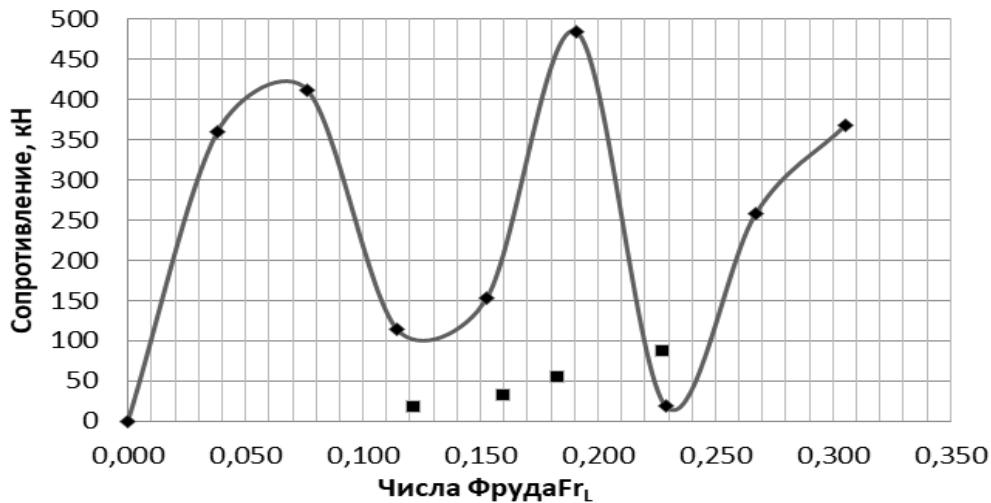
Разнообразные аналитические и экспериментальные данные по оценке сопротивления ЛПВП дают большой разброс значений. Большинство аналитических методик не приемлемы вообще для данного типа судов. Некоторые из них рассматривают нижний предел скоростей около 8 м/с, что значительно превышает значения эксплуатационной скорости платформ. Другие, такие как формулы Большакова В.П., В.П. Большакова-В.А., Летвиненко, Т.А. Зайцевой [2], содержат коэффициенты волнового сопротивления, значение которых снимаются с графиков. Но минимальное значение относительной скорости для коэффициентов, входящих в вышеперечисленные зависимости, составляет  $Fr = 0,3 - 0,45$ . Графики Ньюмена и Пола, Хавелока и другие [3] содержат значения коэффициентов волнового сопротивления от отношения главных размерений  $L/B$  не соответствующих ледокольным платформам.

С помощью формулы (2) и некоторых аналитических выкладок было рассчитано волновое сопротивление. Однако оно значительно отличается от данных натуральных экспериментов (рис. 1), поэтому применение ее для дальнейших расчетов сопротивления разрушения не является актуальным и показывает, что прогнозирование сопротивления даже в чистой воде без волнения вызывает значительные трудности.

Известные полуэмпирические и эмпирические зависимости также предлагают различные методики расчета сопротивления в чистой воде. Однако многообразие методов делают затруднительным выбор подходящего для определения сопротивления любой платформы и не позволяют объективно их оценить. В связи с этим использовались результаты натуральных испытаний соответствующих судов (рис. 2). Проверка достоверности представленных результатов была произведена для платформы ВП-1, у которой полностью сегментировано ГО.

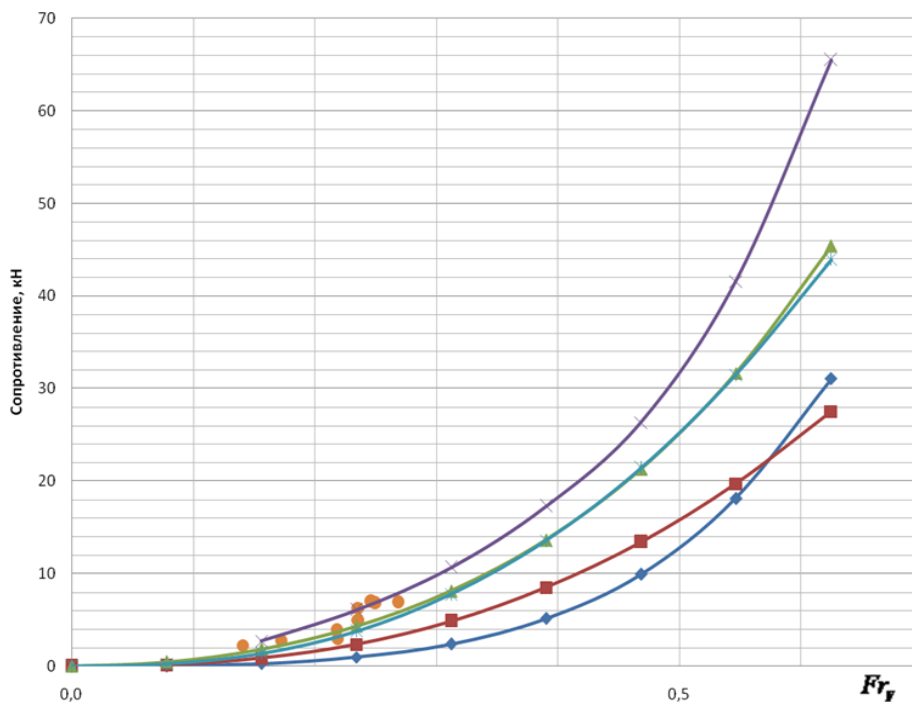
На представленных рисунках (рис. 1,2) видно, что аналитические и полуэмпирические зависимости показывают многообразие различных методик, но, к сожалению, разброс данных по оценке сопротивления очень велик.

Судам на воздушной подушке посвящены и относительно недавние научные исследования [4-8], где затрагиваются вопросы определения сопротивления. Однако основные расчеты и натурные данные даются для судов, эксплуатирующихся при числах Фруда более 0,25, что не соответствует тихоходности несамоходных платформ.



**Рис. 1. Результаты расчета сопротивления движению в чистой воде для ЛПВП 107П по аналитическим зависимостям и данные натуральных испытаний:**

- – экспериментальные данные сопротивления для ледокольной платформы 107П;
- – данные по аналитической формуле  $R = R_a + R_{имп} + R_в + R_{ост} + R_{волн}^{дон}$ .



**Рис. 2. Расчет сопротивления движению в чистой воде и данные натуральных испытаний для ЛПВП ВП-1:**

- – данные натуральных испытаний;
- ◆ – формула Фаулера  $R_в = C(V/V_{кр}) \frac{\rho_в V^2}{2} B_{ВП} h_{ВП}$
- ✱ – формула  $R = k \rho_{ВП} B_{ВП} \frac{V^2}{2g}$
- – формула  $R_{ГД} = k_1 (Fr_h) k_2 (L/B) \frac{\rho_{ВП}^2 B_{ВП}}{\rho_в g}$
- ▲ – формула  $R_{ГД} = k(Fr) k(L/B) \frac{\rho_в V^2}{2} B_{ВП} h_{ВП}$
- ✱ – формула  $\frac{R_в}{Dg} = f_1(Fr_V) f_2(L/B) f_3(\bar{q}) f_4\left(\frac{H_0}{h_{ВП}}\right)$

Для уточнения зависимостей определения сопротивления ЛПВП при низких скоростях хода в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева были проведены масштабные эксперименты в чистой воде. Для этого использовался ледовый бассейн, имеющий гравитационную систему буксировки модели. Предметом исследования являлись модели ледокольных платформ, у которых варьировалось отношение главных размеров  $L/B$  ( $0,7 < L/B < 1,4$ ), что соответствует ранее спроектированным и эксплуатируемым ЛПВП. Использовалась камерная схема формирования воздушной подушки с непосредственной подачей воздуха в подушку.

Давление в воздушной подушке изменялось за счет приемки твердого балласта и контролировалось по дифференциальному манометру. Изменение частоты вращения вентилятора влекло за собой изменение расхода воздуха. Кроме этого, для расхода воздуха была построена калибровочная диаграмма (рис. 3). Она была получена на подготовительном этапе с использованием дифференциального манометра и регулятора напряжений на электродвигателе [9].

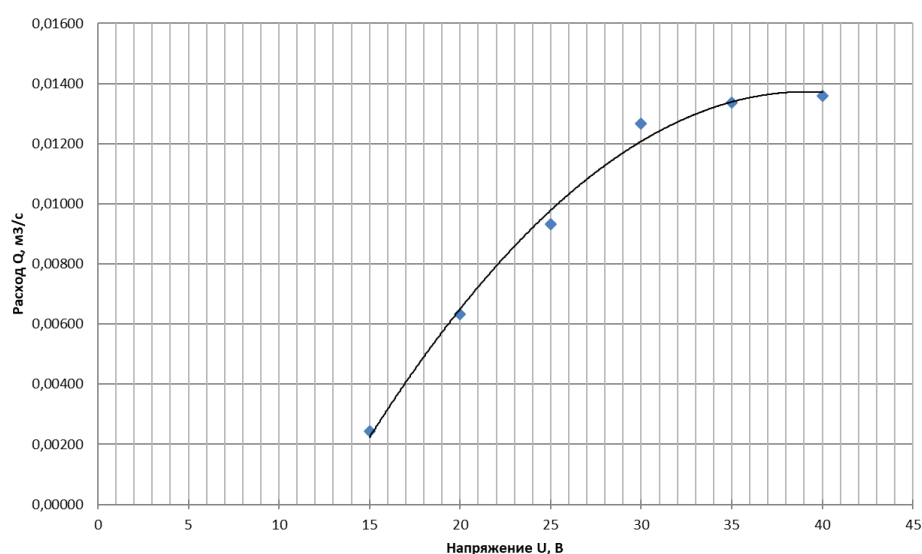


Рис. 3. Калибровочная диаграмма зависимости расхода от напряжения

Во время испытаний измерялись следующие показатели: взвешиванием масса модели; по дифференциальному манометру давление в ВП; по калибровочной диаграмме расход воздуха; по частотомеру скорость движения модели; по весу буксировочного груза сопротивление модели.

Сопротивление в чистой тихой воде можно представить, как зависимость от взаимонезависимых параметров различной природы:

$$R = f_1(m, L, B, H_0, g, \rho_e, P_{ВП}, Q, v...) \quad 3)$$

Однако для дальнейшего исследования данных параметров удобнее перевести их в безразмерный вид и составить выражение, как произведение этих безразмерных комплексов, которые определяют процесс взаимодействия ЛПВП с окружающей средой.

Основополагающими параметрами, имеющие большое влияние на сопротивление, являются:

- значение числа Фруда по водоизмещению  $Fr_V = \frac{v}{\sqrt{g^3 D / \rho_e}}$ ,

- безразмерный расход  $\bar{q} = \frac{Q}{S_{ВП} \sqrt{2p_{ВП} / \rho_{возд}}}$ ,
- соотношение главных размерний платформы в плане L/B,
- отношение глубины бассейна к глубине воздушной впадины  $\frac{H_{\bar{o}}}{h_{ен}}$ .

Формула безразмерного сопротивления примет вид:

$$\frac{R}{Dg} = f_1(Fr_V)^{m_1} \cdot f_2(\bar{q})^{m_2} \cdot f_3\left(\frac{L}{B}\right)^{m_3} \cdot f_4\left(\frac{H_{\bar{o}}}{h_{ен}}\right)^{m_4}, \quad (4)$$

Для каждой массы модели (масса варьировалась от 14 до 21 кг) было проведено испытание с тремя разными отношениями L/B и тремя разными расходами, что дало более полную картину происходящих влияний параметров на сопротивление ЛПВП.

Каждая из представленных составляющих в (4) исследовалась отдельно с помощью модельного эксперимента, а далее, используя аппроксимирующий подход, находились неизвестных коэффициенты, причем среднеквадратическое отклонение не превышало 10 %.

Таким образом, составляющая безразмерного сопротивления окончательно примет вид:

$$\frac{R}{mg} = 0,32 \cdot Fr_V^{2,5} \quad (5)$$

Полученное выражение соответствует условиям опыта и справедливо для диапазонов числа Фруда по длине и водоизмещению:

$$\begin{aligned} 0 \leq Fr_V \leq 0,40 \\ 0 \leq Fr_L \leq 0,30 \end{aligned} \quad (6)$$

При исследовании влияния отношения сторон подушки рассматривался диапазон  $0,7 < L/B < 1,4$ , что соответствует диапазону эксплуатируемых платформ, и, проанализировав имеющиеся данные, зависимость примет степенной вид:

$$f_3\left(\frac{L}{B}\right)^{m_3} = \left(\frac{L}{B}\right)^{-0,31} \quad (7)$$

Ранее считалось, что влияние расхода воздуха на сопротивление носит незначительный характер. Как показывали испытания моделей при диапазоне безразмерных расходов  $0,0020 \leq \bar{q} \leq 0,0036$ , изменение расхода не повлияло на сопротивление ЛПВП, поэтому принималось, что данная функция равна единице  $f_2(\bar{q}) = 1$  [10].

Однако обзор имеющихся платформ на воздушной подушке показал, что некоторые из них работают при безразмерных расходах, не превышающих 0,0015. Поэтому было принято решение провести дополнительные испытания, чтобы исследовать влияние расхода на сопротивление при изменении безразмерного расхода в диапазоне  $0,0007 \leq \bar{q} \leq 0,0013$ .

Анализируя полученные данные, зависимость безразмерного расхода можно представить в виде:

$$f_2(\bar{q}) = 0,07 \cdot (\bar{q})^{-0,41}, \quad (8)$$

что справедливо для диапазона  $0,0007 \leq \bar{q} \leq 0,0013$ .

При исследовании влияния мелководья на сопротивление за безразмерный параметр было принято отношение глубины подушки к высоте воздушной впадины  $\frac{H_{\bar{o}}}{h_{ен}}$ . Мелководье моделировалось за счет уменьшения глубины опытового бассейна при помощи металлических листов (рис. 4).



Рис. 4. Моделирование мелководья в опытном бассейне

В рассматриваемом диапазоне скоростей влияние мелководья на сопротивление может быть выражено зависимостью:

$$f_4 \left( \frac{H_6}{h_{en}} \right) = \frac{1,05}{\left( \frac{H_6}{h_{en}} \right)^{1,6}} + 1, \quad (9)$$

Используя полученные зависимости, полная формула сопротивления ледокольной платформы на воздушной подушке примет вид:

для  $0,0007 \leq \bar{q} \leq 0,0013$

$$R = (0,32 \cdot Fr_V^{2,5}) \cdot \left( 0,07 \cdot \left( \frac{\bar{q}}{q} \right)^{-0,41} \right) \cdot \left( \left( \frac{L}{B} \right)^{-0,31} \right) \cdot \left( \frac{1,05}{\left( \frac{H_6}{h_{en}} \right)^{1,6}} + 1 \right) \cdot m g; \quad (10)$$

для  $0,0020 \leq \bar{q} \leq 0,0036$

$$R = (0,32 \cdot Fr_V^{2,5}) \cdot \left( \left( \frac{L}{B} \right)^{-0,31} \right) \cdot \left( \frac{1,05}{\left( \frac{H_6}{h_{en}} \right)^{1,6}} + 1 \right) \cdot m g; \quad (11)$$

Для проверки адекватности предлагаемых формул было проведено сравнение с натурными данными ЛПВП: 107П и ВП-1. Платформы эксплуатировались на глубокой воде, причем для 107П безразмерный расход находился в диапазоне  $0,0020 \leq \bar{q} \leq 0,0036$ , поэтому расчет сопротивления производился по формуле (11), а для ВП-1 – по формуле (10), так как безразмерный расход попадал в диапазон  $0,0007 \leq \bar{q} \leq 0,0013$ . На рис. 5 и 6 представлены результирующие кривые сравнения предлагаемой зависимости с натурными данными платформ. Предлагаемые зависимости (10) и (11) показывают хорошую сходимость с натурными данными.

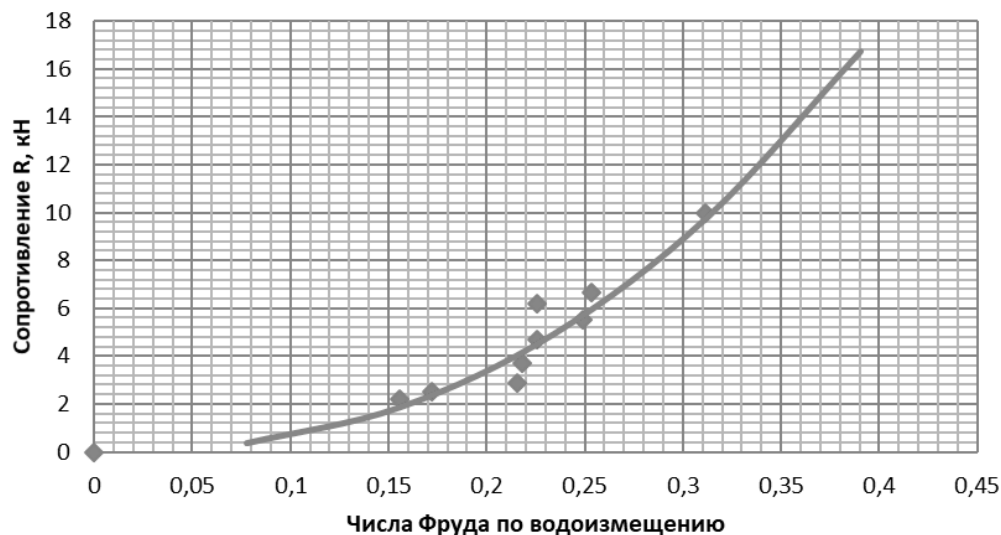


Рис. 5. Графики сравнения натуральных данных ЛПВП ВП-1 с предлагаемыми формулами (10):

◆ – данные натуральных испытаний; ——— – теоретическая кривая сопротивления

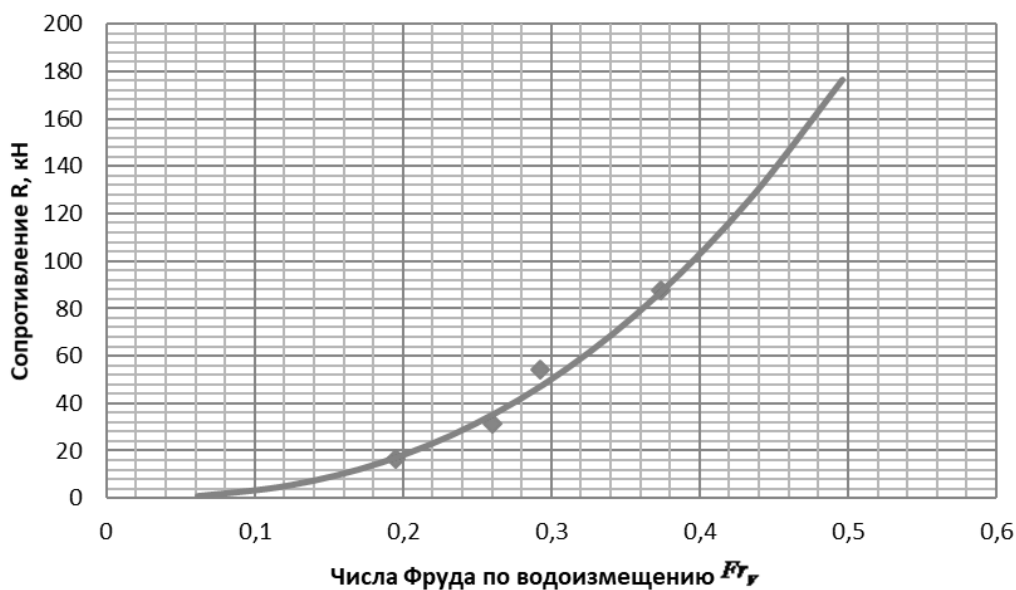


Рис. 6. Графики сравнения натуральных данных ЛПВП 107П с предлагаемыми формулами (11):

◆ – данные натуральных испытаний; ——— – теоретическая кривая сопротивления

### Библиографический список

1. Демешко, Г.Ф. Проектирование судов. Амфибийные суда на воздушной подушке: Учебник [Текст] / Г.Ф. Демашко. – СПб: Судостроение, 1992. – 283 с.
2. Большаков, В. П. Волновое сопротивление системы поверхностных давлений [Текст] / В.П. Большаков // Труды XIII-й науч.-техн. конф, 1963. Вып. 49. С. 68-88.
3. Newman, J.N., and Poole, F.A.P. The wave resistance of a moving pressure distribution in a canal [Текст] / J.N. Newman, F.A.P. Poole. – Schiffstechnik, 1962. P. 9, 45, 21-26.

4. Pogorelova, A.V. Effect of bottom slope on the wave resistance of an air-cushion vehicle in unsteady motion over an ice sheet [Текст] // Proceedings of the twenty-second international offshore and polar engineering conference. 2012. Pp.1393-1397.
5. Day, A.H. Resistance of a compartmented surface-effect ship [Текст] / A.H. Day, D. Clelland, L.J. Doctors, P. Beveridge // Journal of ship production and design. 2010. Vol. 26, No. 3, pp. 219-230.
6. Pogorelova, A.V. Wave resistance of an air-cushion vehicle in unsteady motion over an ice sheet [Текст] / A.V. Pogorelova // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2008. 49 (1), pp. 71-79.
7. Phan, A.T. A Study on Hovercraft Resistance Using Numerical Modeling [Текст] / A.T. Phan // Applied Mechanics and Materials. 2016. Vol. 842, pp. 186-190.
8. Liang, Y. Theory and Design of Air Cushion Craft [Текст] / Y. Liang, B. Alan. – New York, Toronto: John Wiley & Sons Inc., 2000.
9. Семенова, Н.М. Подготовка исходной информации для экспериментального исследования сопротивления ледокольных платформ на воздушной подушке на чистой воде [Текст] / Н.М. Семенова // XVI нижегородская сессия молодых ученых (технические науки). – Н. Новгород, 2011. С. 68-72.