

DOI 10.15589/jnn20170103

УДК 629.5.01

3-17

CALCULATION OF DYNAMIC PARAMETERS
OF THE HOVERCRAFT'S LIFTING COMPLEXРАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОДЪЕМНОГО
КОМПЛЕКСА АМФИБИЙНЫХ СУДОВ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ**Volodymyr V. Zaitsev**

zv1949@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3637-9273

Valerii V. Zaitsev

zvalv1974@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8590-5671

Dmytro V. Zaitsev

zdmv11982@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5778-4668

Olha N. Zaitseva

magdolga1986@gmail.com

ORCID: 0000-0003-3548-4220

В. В. Зайцев,

д-р техн. наук, проф.

Вал. В. Зайцев,

д-р техн. наук, доц.

Д. В. Зайцев,

канд. техн. наук, доц.

О. Н. Зайцева,

асп.

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv**Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*

Abstract. A mathematical model for simulation and designing of the hovercraft's lifting complex has been developed. The mathematical model allows calculating the parameters of the hovercraft's lifting complex in different modes of its operation. The equations presented in the models allow calculating the air pressure in both rigid and flexible receivers of the lifting complex, in the sections of the air cushion, as well as the required pressure of blowers. Furthermore, it is possible to determine the air flow rates in the bow, stern and side flexible receivers, as well as the air flow rate from air cushion sections to the atmosphere.

Keywords: hovercraft; lifting complex; air flow rate; blower; flexible receiver; rigid receiver.

Аннотация. Создана математическая модель для моделирования и проектирования подъемного комплекса амфибийного судна на воздушной подушке (СВПА), которая позволяет вычислять параметры подъемного комплекса СВПА в различных режимах его эксплуатации. Зависимости, представленные в математической модели, дают возможность рассчитать давления воздуха в жестких и гибких ресиверах подъемного комплекса, в секциях воздушной подушки и необходимый напор нагнетателей. Допустимо определение расходов воздуха в гибкий ресивер носового, кормового и бортовых гибкого ограждения, а также из секций воздушной подушки в атмосферу.

Ключевые слова: амфибийное судно на воздушной подушке; подъемный комплекс; расход воздуха; нагнетатель; гибкий ресивер; жесткий ресивер.

Анотація. Створено математичну модель для моделювання і проектування підйомного комплексу амфібійного судна на повітряній подушці (СППА), яка дозволяє обчислювати параметри підйомного комплексу СППА в різних режимах його експлуатації. Залежності, представлені в математичній моделі, дають можливість розрахувати тиски повітря в жорстких і гнучких ресиверах підйомного комплексу, у секціях повітряної подушки і необхідний напір нагнітачів. Припустимо визначення витрат повітря в гнучкий ресивер носового, кормового і бортових гнучкого огороження, а також із секцій повітряної подушки в атмосферу.

Ключові слова: амфібійне судно на повітряній подушці; підйомний комплекс; витрата повітря; нагнітач; гнучкий ресивер; жорсткий ресивер.

REFERENCES

- [1] Zlobin G. P., Smigelskiy S. P. *Suda na podvodnykh krylyakh i na vozduшной podushke (po materialam inostranoy pechati)* [Hydrofoil ships and hovercrafts (based on the foreign press)]. Leningrad, Sudostroyenie Publ., 1976. 264 p.

- [2] Kolyzayev B. A., Kosorukov A. I., Litvinenko V. A. *Spravochnik po proektirovaniyu sudov s dinamicheskimi printsipami podderzhaniya* [Guide to the design of vessels with dynamic support principles]. Leningrad, Sudostroyenie Publ., 1980. 472 p.
- [3] Lyubimov V. I., Pospelov V. I., Gorbunov Yu. V. *Suda na vozduшной podushke. Ustroystvo i ekspluatatsiya* [Hovercrafts. Arrangement and operation]. Moscow, Transport Publ., 1984. 207 p.
- [4] Maklivi R. *Suda na podvodnykh krylyakh i vozduшной podushke* [Hydrofoil and air cushion ships]. Leningrad, Sudostroyenie Publ., 1981. 208 p.
- [5] Smirnov S. A. *Suda na vozduшной podushke skegovogo tipa* [Sidewall hovercrafts]. Leningrad, Sudostroyenie Publ., 1983. 216 p.
- [6] Voytkunskiy Ya. I. *Spravochnik po teorii korablya: v 3 t. T.3: Upravlyayemost vodoizmeshchayushchikh sudov. Gidrodinamika sudov s dinamicheskimi printsipami podderzhaniya* [Guide to the ship theory in 3 volumes. Volume 3: Controllability of displacement ships. Hydrodynamics of the ships with dynamic support principles]. Leningrad, Sudostroyenie Publ., 1985. 544 p.
- [7] Yun Liang, Alan Bliault. *Theory and design of air cushion craft*. London, Yun and A. Bliault Publ., 2000. 632 p.
- [8] Zaitsev V. V., Zaitsev Val. V., Lukashova V. V., *Imitatsionnoye modelirovaniye podyemnogo kompleksa sudna na vozduшной podushke skegovogo tipa v rezhime viseniya bez hoda* [Simulation modeling of the lifting complex of the surface effect ship in the mode of motionless hovering]. *Sbornik nauchnykh trudov NUK — Collection of Scientific Publications of NUOS*, 2015, no. 2, issue 458, pp. 12–15.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Расчет динамических параметров подъемного комплекса СВПА является сложной задачей, которая возникает на начальных стадиях современного проектирования таких судов. Кроме того, данную проблему необходимо решать при имитационном моделировании СВПА и его подъемного комплекса. Такое имитационное моделирование, в свою очередь, дает возможность выбрать на этапе проектирования рациональную схему подъемного комплекса (ПК) и состав его элементов.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Публикации, описывающие проектирование судов на воздушной подушке и их ПК, существуют уже несколько десятилетий [1–8]. Методики оценки параметров подъемного комплекса в этих работах дают приемлемые результаты, но в основном не позволяют моделировать динамику ПК и основываются на полуэмпирических математических моделях.

ЦЕЛЬ СТАТЬИ — создание математической модели, которая позволит представить подъемный комплекс амфибийного судна на воздушной подушке и вычислять его параметры в любой момент моделируемого времени.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Состояние ПК СВПА в каждый момент времени *t* может быть описано системой дифференциальных уравнений неразрывности воздуха:

$$\{Eq_i\} \quad i \in 1 \dots n, \tag{1}$$

где *n* — количество емкостей в пневматической системе, описывающей ПК СВПА; *Eq_i* — *i*-е уравнение системы.

Дифференциальное уравнение для *i*-й емкости системы (рис. 1) представлено в виде:

$$Eq_i \leftarrow \sum_{j=1}^n m_{ji} - \sum_{j=1}^n m_{ij} = W_i \frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \frac{dW_i}{dt}, \tag{2}$$

где *m_{ji}* — входящие в *i*-ю емкость массовые расходы воздуха, кг/с; *m_{ij}* — исходящие из *i*-ой емкости массовые расходы воздуха, кг/с; *W_i* — объем *i*-й емкости системы, м³; *ρ_i* — плотность воздуха в *i*-й емкости системы, кг/м³.

На рис. 1 знаками «←» и «+» обозначены знаки расходов воздуха, т. е. исходящий из емкости воздух вычисляется со знаком «минус», а входящий со знаком «плюс».

Массовый расход воздуха *m_{ij}* в направлении *i* → *j* определяется зависимостью:

$$m_{ij} = \rho_i Q_{ij}, \tag{3}$$

где *Q_{ij}* — объемный расход воздуха, м³/с.

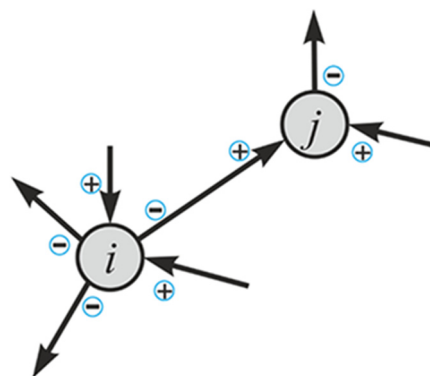


Рис. 1. Схематическое изображение пары объемов системы ПК СВПА

Объемный расход воздуха вычисляется с помощью следующей формулы:

$$Q_{ij} = S_{ij} \mu_{ij} \sqrt{\frac{2 \cdot (P_i - P_j)}{\rho_i}}, \quad (4)$$

где S_{ij} — площадь отверстия, соединяющего емкости i и j , м²; $\mu_{ij} = 0,6 + 1,45 \cdot 10^{-6} (P_i - P_j)$ — коэффициент поджатия струи воздуха; P_i, P_j — избыточные (превышающие атмосферное) давления воздуха в емкостях i и j , Па.

В процессе численного решения системы уравнений (1–4) неразрывности воздуха возникает необходимость по известному избыточному давлению воздуха P найти его плотность ρ и наоборот.

Функция для расчета плотности воздуха, ρ_{air} , кг/м³ от его избыточного давления P , Па и функция вычисления избыточного давления от плотности воздуха определяются выражениями из [8].

$$\rho_{air}(P) = \left(1 + \frac{P}{P_{atm}} \frac{1}{K}\right) \rho_{atm}, \quad (5)$$

где $P_{atm} = 101325$ — атмосферное давление воздуха, Па; $K = 1,4$ — коэффициент; $\rho_{atm} = 1,225$ — плотность воздуха при атмосферном давлении, кг/м³.

$$\rho_{air}(\rho) = \frac{K \cdot P_{atm} \cdot (\rho - \rho_{atm})}{\rho_{atm}}. \quad (6)$$

Исходными данными и основными параметрами для расчета ПК СВПА являются следующие величины и матрицы:

- n — количество емкостей в пневматической системе;
- n_f — количество нагнетателей;
- n_o — количество связей;
- матрица объемов:

$$[W] = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \dots \\ W_n \end{bmatrix};$$

– матрица давлений в объемах:

$$[P] = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \dots \\ P_n \end{bmatrix};$$

– матрица напоров в нагнетателях:

$$[PV] = \begin{bmatrix} in_1 & out_1 & PV_1 \\ in_2 & out_2 & PV_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ in_{n_f} & out_{n_f} & PV_{n_f} \end{bmatrix},$$

– матрица связей (отверстий):

$$[SV] = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & s_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 & s_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{n_o} & \beta_{n_o} & s_{n_o} \end{bmatrix},$$

где in_i, out_i — номера емкостей, между которыми расположен нагнетатель; PV_i — напор i -го нагнетателя; α_i, β_i — номера емкостей, между которыми расположено отверстие, s_i .

Расчет производится в такой последовательности:

- подготовка исходных данных;
- выполнение вычислений, относящихся к начальному моменту времени t_0 ;
- выполнение вычисления (имитационного моделирования) в заданном промежутке времени — $[t_0; t_k]$.

Для начального момента времени t_0 в матрице $[PV]$ задаются напоры нагнетателей и с помощью зависимости (5) находятся соответствующие плотности воздуха $[\rho_i]$. Далее в матрице $[P]$ принимаются начальные избыточные давления для всех объемов подъемного комплекса и рассчитываются соответствующие плотности воздуха $[\rho]$. Затем заполняется матрица объемов $[W]$. В дальнейшем в ходе имитации часть элементов этой матрицы будет меняться, т. к. подвергнуты преобразованию форма и соответственно объем гибких ограждений (ГО) и секций ВП. Кроме того, необходимо внести значения матрицы связей $[SV]$ для начального момента времени. В ходе имитации значения элементов этой матрицы в основном будут неизменными, но есть исключения — площади воздушных зазоров между нижними кромками ГО и водной поверхностью.

Далее необходимо определить начальные расходы воздуха: объемные — Q_{ij} ; массовые — m_{ij} .

Последним шагом, относящимся к вычислениям в начальный момент времени, является нахождение для каждой i -й емкости производной $\frac{d\rho_i}{dt}$ после преобразования (2) к виду:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \frac{\sum_{j=1}^n m_{ji} - \sum_{j=1}^n m_{ij}}{W_i}. \quad (7)$$

Для начального момента времени для всех емкостей принято, что $\frac{dW_i}{dt} = 0$.

На этапе имитационного моделирования в начале принимается шаг интегрирования Δt . Затем в этом промежутке времени $[t_0; t_k]$ последовательно выполняются шаги имитационного моделирования.

Алгоритм выполнения каждого шага следующий:

– вычисление новых значений плотности воздуха в каждой емкости:

$$[\rho] = [\rho] + \Delta t \cdot \frac{d\rho}{dt};$$

– определение новых значений давлений воздуха в каждой емкости:

$$[P] = P_{air}([\rho]);$$

– расчет в соответствии с (4) новых значений объемных расходов воздуха Q_{ij} ;

– нахождение согласно (3) новых значений массовых расходов воздуха m_{ij} ;

– вычисление новых значений объемов для ресиверов ГО и ВП и обновление значений матрицы $[W]$;

– расчет скоростей изменения объемов $\left[\frac{dW}{dt}\right]$;

– определение в соответствии с (2) для каждой i -й емкости нового значения производной $\frac{d\rho_i}{dt}$.

ВЫВОДЫ. Применение описанной методики позволяет, в первую очередь, оценить параметры подъемного комплекса СВПА при различных режимах эксплуатации судна на тихой воде и на волнении.

Принципы, описанные здесь, можно использовать и для имитационного моделирования эксплуатации СВПА с учетом условий водоемов Украины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] **Злобин Г. П.** Суда на подводных крыльях и на воздушной подушке (по материалам иностранной печати) [Текст] : справочное пособие / Г. П. Злобин, С. П. Смигельский. — Л. : Судостроение, 1976. — 264 с.
- [2] **Кользаев Б. А.** Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания [Текст] / Б. А. Кользаев, А. И. Косоруков, В. А. Литвиненко. — Л. : Судостроение, 1980. — 472 с.
- [3] **Любимов В. И.** Суда на воздушной подушке. Устройство и эксплуатация [Текст] / В. И. Любимов, В. И. Поспелов, Ю. В. Горбунов. — М. : Транспорт, 1984. — 207 с.
- [4] **Макливи Р.** Суда на подводных крыльях и воздушной подушке [Текст] : пер. с англ. / Р. Макливи. — Л. : Судостроение, 1981. — 208 с.
- [5] **Смирнов С. А.** Суда на воздушной подушке скегового типа [Текст] / С. А. Смирнов. — Л. : Судостроение, 1983. — 216 с.
- [6] Справочник по теории корабля : в 3 т. [Текст] / под ред. Я. И. Войткунского. — Л. : Судостроение, 1985. — Т. 3 : Управляемость водоизмещающих судов. Гидродинамика судов с динамическими принципами поддержания. — 544 с.
- [7] **Yun Liang.** Theory and design of air cushion craft [Text] / Liang Yun, Alan Bliault. — London : Yun and A. Bliault, 2000. — 632 p.
- [8] **Зайцев В. В.** Имитационное моделирование подъемного комплекса судна на воздушной подушке скегового типа в режиме висения без хода [Текст] / В. В. Зайцев, Вал. В. Зайцев, В. В. Лукашова, А. А. Лысый // Зб. наук. праць НУК. — Миколаїв : НУК, 2015. — №2 (458). — С. 12–15.

© В. В. Зайцев, Вал. В. Зайцев, Д. В. Зайцев, О. М. Зайцева

Надійшла до редколегії 27.01.2017

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК д-р техн. наук, проф. *М. Ю. Харитонов*