

DOI 10.15589/jnn20150203

УДК 629.5.01

3-17

**SIMULATION MODELING OF THE LIFTING COMPLEX  
OF THE SURFACE EFFECT SHIP IN THE MODE OF MOTIONLESS HOVERING****ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПОДЪЕМНОГО КОМПЛЕКСА СУДНА НА ВОЗДУШНОЙ  
ПОДУШКЕ СКЕГОВОГО ТИПА В РЕЖИМЕ ВИСЕНИЯ БЕЗ ХОДА****Volodymyr V. Zaitsev**

vladymyr.zaitsev@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3637-9273

**Valerii V. Zaitsev**

valery.zaitsev@nuos.edu.ua

ORCID 0000-0002-8590-5671

**Vikroriia V. Lukashova**

vip\_tory@mail.ru

ORCID: 0000-0002-9633-8027

**Andrii O. Lysyi**

anlis@ami.edu.ua

ORCID: 0000-0002-5596-0856

**В. В. Зайцев,**д-р техн. наук, проф.<sup>1</sup>**Вал. В. Зайцев,**д-р техн. наук, доц.<sup>1</sup>**В. В. Лукашова,**ассист.<sup>1</sup>**А. А. Лысый,**канд. техн. наук, доц.<sup>2</sup><sup>1</sup>*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*<sup>2</sup>*Azov Maritime Institute of Odessa National Maritime Academy, Mariupol*<sup>1</sup>*Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев*<sup>2</sup>*Азовский морской институт Одесской национальной морской академии, г. Мариуполь*

**Abstract.** The mathematical model for designing a lifting complex of the surface effect ship (SES) in the mode of motionless hovering has been developed on the basis of its simulation modeling. The mathematical model enables calculating the air flow rates from the airway channels into the air cushion, from the air cushion through the flexible seals into the atmosphere, from the air cushion into the airway channels, from the airway channels into the rigid receiver, from the rigid receiver into the fans suction of the lifting complex, from the airway channels into the flexible bag of the stern flexible seal, from the air cushion through the bow and stern flexible seals into the atmosphere. Besides, it is possible to determine the required performance of the fans of the lifting complex, as well as the required pressures of the fans with the losses allowance.

**Keywords:** surface effect ship; lifting complex; air flow rate; performance; fan; pressure.

**Анотация.** Создана математическая модель для проектирования подъемного комплекса судна на воздушной подушке скегового типа (СВПС) в режиме висения без хода на основе его имитационного моделирования. Математическая модель позволяет выполнить расчеты расходов воздуха в различных элементах СВПС, определить требуемую производительность вентиляторов подъемного комплекса, а также требуемые напоры вентиляторов.

**Ключевые слова:** судно на воздушной подушке скегового типа; подъемный комплекс; расход воздуха; производительность; вентилятор; напор.

**Анотація.** Створено математичну модель для проектування підйомного комплексу судна на повітряній подушці скегового типу (СППС) в режимі висіння без ходу на основі його імітаційного моделювання. Математична модель дозволяє виконати розрахунки витрат повітря в різних елементах СППС, визначити потрібну продуктивність вентиляторів підйомного комплексу, а також потрібні напори вентиляторів.

**Ключові слова:** судно на повітряній подушці скегового типу; підйомний комплекс; витрата повітря; продуктивність; вентилятор; натиск.

**REFERENCES**

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

- [2] Kolyzaev 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, Sudostroenie Publ., 1980. 472 p.
- [3] Lyubimov V.I., Pospelov V.I., Gorbunov Yu. V. *Suda na vozdushnoy podushke. Ustroystvo i ekspluatatsiya* [Air cushion ships. Arrangement and operation]. Moscow, Transport Publ., 1984. 207 p.
- [4] Maklivi R. *Suda na podvodnykh krylyakh i vozdushnoy podushke* [Hydrofoil and air cushion ships]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1981. 208 p.
- [5] Smirnov S.A. *Suda na vozdushnoy podushke skegovogo tipa* [Surface effect ships]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1983. 216 p.
- [6] Voytkunskiy Ya. I. *Spravochnik po teorii korablya: v 3 t. T.3: Upravlyaemost 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, Sudostroenie 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.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Проектирование подъемного комплекса (ПК) — сложная задача, первым этапом решения которой является определение характеристик подъемного комплекса судна на воздушной подушке скегового типа в режиме его висения без хода. Впоследствии полученные характеристики корректируются с учетом морского волнения. В данной статье рассматривается первый этап проектирования подъемного комплекса.

Подъемный комплекс СВПС состоит из воздухонагнетателей (вентиляторов) с приводными двигателями и соединительными трансмиссиями, воздуховодов, воздухозаборников и подвижных концевых гибких ограждений (ГО) воздушной подушки (ВП). Функцией подъемного комплекса является поддержание основного корпуса СВПС на достаточном удалении от поверхности воды. Эту задачу ПК решает, создавая подъемную силу воздействием статического давления воздуха на днищевую часть основного корпуса, расположенную между скегами.

Наиболее ответственным этапом проектирования ПК является выбор его рациональной схемы, определение состава элементов и расчет их характеристик. Кроме прочего, необходимо выбрать такие нагнетатели, которые благодаря своим характеристикам, смогут обеспечить напор и расход воздуха для поддержания СВПС в различных режимах.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Публикации, относящиеся к проектированию подъемного комплекса СВПС, существуют уже около 40 лет [1–7]. Описанные в этих публикациях методики дают приемлемые результаты, но основываются на полуэмпирических математических моделях, что не позволяет во всех подробностях оценить и оптимизировать элементы ПК СВПС.

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ** — создание математической модели для проектирования подъемного комплекса судна на воздушной подушке скегового типа на основе

его имитационного моделирования в режиме висения без хода.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

При проектировании судов с динамическим принципом поддержания необходимо с особым вниманием подойти к вопросам определения характеристик подъемного комплекса, выбора состава элементов и рациональной схемы ПК, так как от этого напрямую зависит эффективность проектируемого судна.

В качестве примера показано создание математической модели подъемного комплекса СВПС в режиме висения для схемы, представленной на рис. 1.

Для определения расходов воздуха и его плотности использовались уравнения неразрывности потока воздуха, проходящего по подъемному комплексу СВПС.

Уравнения неразрывности для труб 1–6 представлены ниже:

$$\rho_{В.1}Q_{В.1} - \rho_{Т.1}Q_{Т.1} = \rho_{Т.1} \frac{dW_{Т.1}}{dt} + W_{Т.1} \frac{d\rho_{Т.1}}{dt},$$

$$\rho_{В.2}Q_{В.2} - \rho_{Т.2}Q_{Т.2} = \rho_{Т.2} \frac{dW_{Т.2}}{dt} + W_{Т.2} \frac{d\rho_{Т.2}}{dt},$$

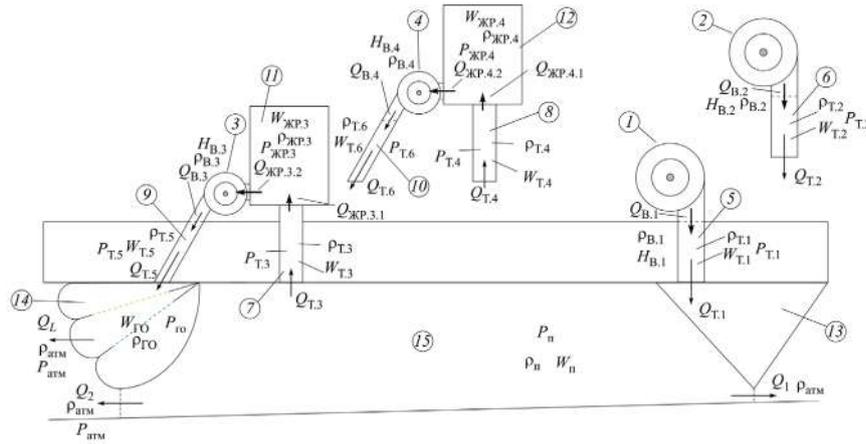
$$\rho_{П}Q_{Т.3} - \rho_{Т.3}Q_{ЖР.3.1} = \rho_{Т.3} \frac{dW_{Т.3}}{dt} + W_{Т.3} \frac{d\rho_{Т.3}}{dt},$$

$$\rho_{П}Q_{Т.4} - \rho_{Т.4}Q_{ЖР.4.1} = \rho_{Т.4} \frac{dW_{Т.4}}{dt} + W_{Т.4} \frac{d\rho_{Т.4}}{dt},$$

$$\rho_{В.3}Q_{В.3} - \rho_{Т.5}Q_{Т.5} = \rho_{Т.5} \frac{dW_{Т.5}}{dt} + W_{Т.5} \frac{d\rho_{Т.5}}{dt},$$

$$\rho_{В.4}Q_{В.4} - \rho_{Т.6}Q_{Т.6} = \rho_{Т.6} \frac{dW_{Т.6}}{dt} + W_{Т.6} \frac{d\rho_{Т.6}}{dt},$$

где  $W_{Ti}$  — объем  $i$ -ой трубы,  $m^3$ ;  $\rho_{Ti}$  — плотность воздуха в  $i$ -ой трубе,  $kg/m^3$ ;  $Q_{Ti}$  — расход воздуха для  $i$ -ой трубы,  $m^3/c$ ;  $Q_{Bj}$  — производительность  $j$ -го вентилятора,  $m^3/c$ ;  $\rho_{Bj}$  — плотность воздуха на выходе  $j$ -го вентилятора,  $kg/m^3$ ;  $t$  — время,  $c$ ;  $Q_{ЖР.3.1}$ ,  $Q_{ЖР.4.1}$  — расходы воздуха из труб 3, 4 в жесткие ресиверы 3, 4 вентиляторов 3 и 4,  $m^3/c$ .



**Рис. 1.** Схема подъемного комплекса СВПС: 1, 2, 3, 4 — вентиляторы №1...4; 5, 6, 7, 8, 9, 10 — трубы №1...6; 11, 12 — жесткие ресиверы; 13 — носовое ГО; 14 — кормовое ГО; 15 — воздушная подушка

Уравнение неразрывности для воздушной подушки имеет вид:

$$\begin{aligned} \rho_{T.1}Q_{T.1} + \rho_{T.2}Q_{T.2} - \rho_{П}Q_1 - \rho_{П}Q_2 - \rho_{П}Q_{T.3} - \rho_{П}Q_{T.4} = \\ = \rho_{П} \frac{dW_{П}}{dt} + W_{П} \frac{d\rho_{П}}{dt}, \end{aligned}$$

где  $W_{П}$  — объем воздушной подушки (ВП)  $l$ ,  $m^3$ ;  $Q_1$  — расход воздуха из ВП через носовое ГО в атмосферу,  $m^3/c$ ;  $Q_2$  — расход воздуха из ВП через кормовое ГО в атмосферу,  $m^3/c$ ;  $\rho_{П}$  — плотность воздуха в ВП,  $кг/м^3$ .

Уравнения неразрывности для жестких ресиверов 3, 4 (воздух проходит из жестких ресиверов 3, 4 в вентиляторы 3, 4 в кормовой оконечности судна) выражаются формулами:

$$\begin{aligned} \rho_{T.3}Q_{ЖР.3.1} - \rho_{ЖР.3}Q_{ЖР.3.2} = \\ = \rho_{ЖР.3} \frac{dW_{ЖР.3}}{dt} + W_{ЖР.3} \frac{d\rho_{ЖР.3}}{dt}, \\ \rho_{T.4}Q_{ЖР.4.1} - \rho_{ЖР.4}Q_{ЖР.4.2} = \\ = \rho_{ЖР.4} \frac{dW_{ЖР.4}}{dt} + W_{ЖР.4} \frac{d\rho_{ЖР.4}}{dt}, \end{aligned}$$

где  $W_{ЖР.3}$ ,  $W_{ЖР.4}$  — объемы жестких ресиверов 3 и 4,  $m^3$ ;  $Q_{ЖР.3.2}$ ,  $Q_{ЖР.4.2}$  — расходы воздуха из жестких ресиверов 3, 4 в приемные патрубки вентиляторов 3 и 4,  $m^3/c$ ;  $\rho_{ЖР.3.1}$ ,  $\rho_{ЖР.4.1}$  — плотности воздуха в жестких ресиверах 3 и 4,  $кг/м^3$ .

Уравнение неразрывности для кормового ГО определяется соотношением:

$$\begin{aligned} \rho_{T.5}Q_{T.5} + \rho_{T.6}Q_{T.6} - \rho_{ГО}Q_L = \\ = \rho_{ГО} \frac{dW_{ГО}}{dt} + W_{ГО} \frac{d\rho_{ГО}}{dt}, \end{aligned}$$

где  $W_{ГО}$  — объем ресивера кормового ГО,  $m^3$ ;  $Q_L$  — расход воздуха из ресивера кормового ГО в атмосферу,  $m^3/c$ ;  $\rho_{ГО}$  — плотность воздуха в ресивере кормового ГО,  $кг/м^3$ .

Общий вид уравнений расхода потока воздуха, проходящего по подъемному комплексу СВПС, определяется зависимостью:

$$Q = F_{отв} \mu \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}},$$

где  $F_{отв}$  — площадь отверстия, через которое проходит воздух,  $m^2$ ;  $\mu = 0,6 + 1,45 \cdot 10^{-6} \Delta P$  — коэффициент поджатия струи воздуха;  $\Delta P$  — разность избыточных давлений, в объемах между которыми расположено отверстие, Па.

Зависимость плотности воздуха от его давления выражается формулой:

$$\rho_B(P) = \left(1 + \frac{P}{P_{атм}} \cdot \frac{1}{K}\right) \rho_{атм},$$

где  $\rho_B(P)$  — функция плотности воздуха от давления;  $\rho_{атм} = 1,225 \text{ кг/м}^3$  — плотность воздуха при атмосферном давлении;  $P_{атм} = 101325 \text{ Па}$  — атмосферное давление воздуха;  $K = 1,4$ ;  $P$  — избыточное давление воздуха в соответствующей части подъемного комплекса СВПС, Па.

Потребная производительность вентиляторов 1 и 2 определяется зависимостью:

$$Q_{B.1} = Q_{B.2} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_{T.3} + Q_{T.4}}{2}.$$

Потребная производительность вентиляторов 3 и 4 находится с помощью формулы:

$$Q_{B.3} = Q_{B.4} = \frac{Q_L}{2}.$$

Полученную производительность вентиляторов 1 и 2 необходимо сравнить с эмпирическими зависимостями, которые были определены Е. П. Ронновым и Б. А. Кользаевым.

Суммарная производительность вентиляторов вычисляются по формуле Е. П. Роннова:

$$\sum Q = k k_u B_n U \frac{h_b}{2},$$

где  $k=0,7$  — коэффициент, характеризующий частичную стабилизацию СВПС на волнении;  $k_u=0,6$  — коэффициент, учитывающий снижение скорости судна на волнении;  $h_b=h_{СК}$  — высота расчетной волны;  $h_{СК}$  — высота скегов СВПС, м;  $U$  — скорость судна, м/с.

Суммарная производительность вентиляторов рассчитывается по формуле Б. А. Колызаева:

$$\sum Q = \frac{0,8}{1 + \frac{L_{\Pi}}{B_{\Pi}}} S_{\Pi} \sqrt{h_{СК}},$$

где  $S_i$  — площадь воздушной подушки, м<sup>2</sup>;  $h_{СК}$  — высота скегов, м.

Потери давления от трения воздуха в  $i$ -ой трубе выражаются зависимостью:

$$\Delta H_{T,i} = \frac{\rho_{T,i} Q_{T,i}^2}{2} \left( \frac{1 + \zeta_{T,i}}{F_{\text{Отв.Т.}i}^2} \right),$$

где  $\zeta_{T,i} = \bar{\zeta}_{T,i} \frac{l_{T,i}}{L_{T,i}}$  — коэффициент трения воздуха в  $i$ -ой трубе;  $\bar{\zeta}_{T,i}$  — безразмерный коэффициент трения воздуха в  $i$ -ой трубе;  $l_{T,i}$  — длина  $i$ -ой трубы, м.

Потери давления от трения воздуха в жестких ресиверах 3, 4 определяются следующим образом:

$$\Delta H_{ЖР.3} = \frac{\rho_{ЖР.3} Q_{ЖР.3.2}^2}{2} \left( \frac{1 + \zeta_{ЖР.3}}{(F_{\text{Отв.ЖР.3.2}})^2} \right),$$

$$\Delta H_{ЖР.4} = \frac{\rho_{ЖР.4} Q_{ЖР.4.2}^2}{2} \left( \frac{1 + \zeta_{ЖР.4}}{(F_{\text{Отв.ЖР.4.2}})^2} \right),$$

где  $\zeta_{ЖР.3}$ ,  $\zeta_{ЖР.4}$  — коэффициенты трения воздуха в жестких ресиверах 3, 4.

Полученные зависимости позволили создать алгоритм расчета, показанный ниже.

Исходные данные алгоритма:

$U$ ,  $h_b$ ,  $L_{\Pi}$ ,  $B_{\Pi}$ ,  $h_{СК}$  — длины и площади поперечных сечений труб,  $F_{\text{Отв.Л}}$  — площадь поперечного сечения выхода воздуха из гибкого ресивера кормового ГО,  $S_{\text{ГО}}$  — площадь поперечного сечения ГО,  $P_{\text{П.ПР}}$  — проектное давление в ВП СВПС,  $\Delta h_{\text{НГО}}$ ,  $\Delta h_{\text{КГО}}$  — зазоры

между нижними кромками НГО и КГО поверхностью воды.

Последовательность расчета:

1. Задаются начальные значения избыточных давлений в вентиляторах.

2. Производится расчет следующих величин:

– начальные плотности воздуха в элементах системы ПК СВПС;

– начальные расходы воздуха в элементах системы ПК СВПС;

– начальные производные плотностей воздуха по времени в элементах системы ПК СВПС.

3. При заданном шаге по времени повторно вычисляются плотности воздуха, давления, расходы и производные плотностей воздуха по времени во всех элементах системы ПК СВПС.

Расчет п. 3 повторяется до тех пор, пока не будет выполнено следующее условие: максимальное из значений производных по плотности воздуха в каждом элементе системы ПК СВПС не должно превышать заданную величину погрешности  $\eta$ , т. е.  $\max \left( \frac{dp_i}{dt} \right) \leq \eta$ .

Рекомендуется принимать значение  $\eta$  не более  $1 \cdot 10^{-7}$ .

4. По данным последнего приближения давление в ВП СВПС  $P_{\Pi}$  сравнивается с величиной проектного давления  $P_{\text{П.ПР}}$  и проверяется выполнение условия

$\frac{P_{\text{ГО}}}{P_{\Pi}} \in [1,12 \dots 1,25]$ , вычисляются потери давлений воз-

духа. Если расчетное давление в ВП значительно отличается от проектного или перепад давления между ГО и ВП выходит за рекомендуемый диапазон, то необходимо откорректировать значения избыточных давлений в вентиляторах и повторить расчеты, начиная с п. 2.

**ВЫВОДЫ.** Предложенная методика позволяет проектировать и оценивать параметры подъемного комплекса СВПС как на начальных стадиях проектирования, так и на более поздних этапах.

Принципы, описанные при создании рассмотренной математической модели, могут быть также применены для имитационного моделирования подъемного комплекса СВПС в других режимах эксплуатации судна, в том числе в режимах движения на волнении.

## 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] **Колызаев, Б. А.** Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания [Текст] / Б. А. Колызаев, 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.

---

© В. В. Зайцев, Вал. В. Зайцев, В. В. Лукашова, А. О. Лисий

Надійшла до редколегії 10.02.2015

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. *В. О. Некрасов*