

УДК 629.12

ARTICLE HISTORY

Received 30.01.2023

Accepted 10.02.2023

Зайцев В.В.¹, Зайцев Вал.В.², Зайцев Д.В.³

Национальный университет кораблестроения им. адм. Макарова,

Николаев, Украина

zv1949@gmail.com¹, zvalv1974@gmail.com²,zdmv11982@gmail.com³

Прогнозирование расходов воздуха в подъемном комплексе амфибийных судов на воздушной подушке в штатных режимах их эксплуатации

V. Zaytsev¹, Val. Zaytsev², D. Zaytsev³

National University of Shipbuilding named after Adm. Makarov,

Nikolaev, Ukraine

zv1949@gmail.com¹, zvalv1974@gmail.com²,zdmv11982@gmail.com³

Forecasting air consumption in the lifting complex of hovercraft in their normal operating modes

Резюме – Предложена методика прогнозирования расходов воздуха в подъемном комплексе (ПК) амфибийных судов на воздушной подушке (СВПА) с помощью имитационного моделирования его работы в штатных режимах их эксплуатации и исследования мореходных качеств. Рассмотрено прогнозирование работы подъемного комплекса автомобильно-пассажирского паромы (АПП) на воздушной подушке амфибийного типа "Марал". Система дифференциальных уравнений неразрывности расходов воздуха в ПК АПП "Марал" определяет его состояние в каждый момент времени. Приводится функция для вычисления плотности воздуха от его избыточного давления, а также функция вычисления избыточного давления воздуха от его плотности. Представленная математическая модель, воплощенная в программу, позволяет углубленно анализировать динамику и мореходные качества СВПА до завершения их проектирования и до начала постройки. Разработан алгоритм прогнозирования расходов воздуха в ПК

СВПА в штатных режимах их эксплуатации и исследования мореходных качеств.

Abstract – A method for predicting air flow in the lifting complex (LC) of hovercraft using simulation modeling of its operation in normal modes of their operation and the study of seaworthiness is proposed. The forecasting of the operation of the lifting complex of an amphibious Car-Passenger Ferry (CPF) on an air cushion of the "Maral" type is considered. The system of differential equations for the continuity of air flow rates in the "Maral" determine its state at each moment of time. A function for calculating the air density from its excess pressure, as well as a function for calculating the excess air pressure from its density, is given. The presented mathematical model, embodied in the program, allows in-depth analysis of the dynamics and seaworthiness of hovercrafts before the completion of their design and before the start of construction. An algorithm has been developed for predicting air flow in the hovercraft lifting complex in normal modes of their operation and studying seaworthiness.

DOI: 10.31653/1819-3293-2023-1-28-17-29

Под подъемным комплексом СВПА понимают совокупность систем, устройств и механизмов, призванных постоянно поддерживать под днищем судна область избыточного статического давления воздуха, который, воздействуя на поверхность днища судна снизу вверх, создает подъемную силу, удерживающую СВПА на высоте, определенной техническим заданием (ТЗ) и условиями эксплуатации.

Воздух избыточного давления, заключенный в области под днищем судна, вытекает через щель под периферийным гибким ограждением (ГО) по всему периметру судна и в таком же количестве подается в нее одним или несколькими воздухонагнетателями, являющимися лопаточными машинами, вращение которых осуществляется от приводных двигателей, входящих в состав энергетической установки (ЭУ). В таком понимании подъемный комплекс является компонентом ЭУ.

Воздух, подаваемый в область ВП, забирается нагнетателями из атмосферы через специальные воздухоприемные отверстия в корпусе судна или через специальные каналы в виде шахт, откуда он через конфузор поступает непосредственно к лопаточному устройству нагнетателя. За нагнетателем для воздуха устраивается сложная транспортно-распределительная система, состоящая из диффузоров, преобразующих динамическую составляющую полного давления воздуха, развиваемого нагнетателем, в статическую; внутренних

воздухоуловов, распределяющих воздух по судну и именуемых ресиверами.

Ресиверами при этом являются и надувные конструкции ГО, располагающихся по периферии судна, которые выполняют функции как раздачи воздуха (по пути его движения через специальные сопла и щели или отверстия), так и удержания под днищем судна области ВП, что обеспечивается свойствами ГО, функционирующих в качестве податливой завесы, отклоняющейся при прохождении препятствий на поверхности экрана.

Кроме перечисленных компонентов ПК в него входит устанавливаемая, как правило, только на крупных СВПА система управления и регулирования ПК, в которую включаются стравливающие воздух из ВП клапаны, дроссельные заслонки в воздуховодах, система автоматизированного управления работой непосредственно нагнетателя.

Рассматривая описанный состав ПК, при его проектировании можно выделить следующие задачи.

1. Проектирование ГО области воздушной подушки (ВП).
2. Обоснование расходно-напорных характеристик ПК, обеспечивающих поддержание под судном области ВП.
3. Выбор нагнетателя и приводного двигателя.
4. Расчетно-графическая разработка компоновки подъемного комплекса.

Последовательность, в которой перечислены задачи, в значительной мере условна. Их анализ показывает, что ПК представляет собой сложную динамическую систему, проектирование которой возможно только методом последовательных приближений. Так, например, для решения третьей задачи нужны исходные данные, большинство которых можно получить только после решения остальных задач.

Существуют различные методики и теории проектирования отдельных элементов ПК, в основном различных типов гибких ограждений ПК [1 – 7]. Однако проектирование ГО не может проводиться без учета взаимного влияния всех элементов системы, участвующих в обеспечении подъема и движения СВПА над водной поверхностью. Основные элементы этой системы – корпус судна, движители, ПК, который включает носовое гибкое ограждение (НГО), кормовое гибкое ограждение (КГО), бортовые гибкие ограждения (БГО), внутреннее ГО (продольный и поперечные кили), нагнетатели ВП, обеспечивающие подачу воздуха в ВП и ресиверы ГО, воздухопроводные каналы. В зависимости от величины избыточного

давления воздуха в ВП, зазоров между ГО и водной поверхностью изменяется расход воздуха и соответственно мощность и производительность нагнетателей, изменяются избыточные давления в ресиверах КГО, НГО, БГО, и внутреннего ГО, изменяется их форма и напряженно-деформированное состояние (НДС). Изменение формы ГО приводит к изменению посадки СВПА и соответственно изменяется скорость его движения. На начальных этапах проектирования ГО и нагнетателей сети обычно можно не учитывать влияние параметров воздухопроводных вырезов в оболочках ресиверов СВПА, влияние параметров формы НГО и КГО на параметры нагнетательной установки. На окончательных этапах проектирования все эти факторы необходимо увязать между собой и решить сложнейшую проектную задачу. В работе [8] представлена методика создания симуляций амфибийных судов на воздушной подушке (СВПА) для различных режимов их эксплуатации и исследования мореходных качеств. Рассмотрены различные типы симуляций таких судов и пути их воплощения в функционирующее программное обеспечение. Особое внимание уделено описанию созданию интерактивной симуляции в режиме реального времени. Описаны основные математические модели, которые участвуют в реализации таких симуляций, показана их структура для различных амфибийных судов на воздушной подушке. Представленный комплекс математических моделей, воплощенный в программу, позволяет углубленно анализировать динамику и мореходные качества СВПА до завершения их проектирования и до начала постройки. Данная статья является продолжением работ по прогнозированию работы СВПА.

Цель данной статьи – решение второй задачи и создание методики прогнозирования расходов воздуха в ПК СВПА с помощью имитационного моделирования его работы в штатных режимах их эксплуатации и исследования мореходных качеств.

Решение указанной задачи рассмотрим на примере ПК АПП "Марал" (рис. 1) и базируется на исследовании конструкции его ГО (рис. 2) а также математическая модель системы ПК (рис. 3), состоящей из корпуса СВПА, нагнетательной установки (по два нагнетателя осевых (НО), расположенной симметрично ДП на левом и правом бортах судна; воздухопроводных каналов правого и левого бортов, идущих в НГО, КГО, БГО, продольный и поперечный кили внутреннего ГО).

Гидро- и аэродинамика – наука, которая занимается изучением законов движущихся жидкостей и газов. Законы движения жидкостей справедливы и для газов, если скорости потока оказываются меньше

скорости звука, поскольку в этом случае так можно считать практически.

Для определения в каждый момент времени давлений воздуха во всех составляющих элементах ПК АПП "Марал" необходимо использовать уравнения неразрывности потока воздуха, проходящего по его ПК.



Рис. 1. Общий вид автомобильно-пассажирского паром "Марал"

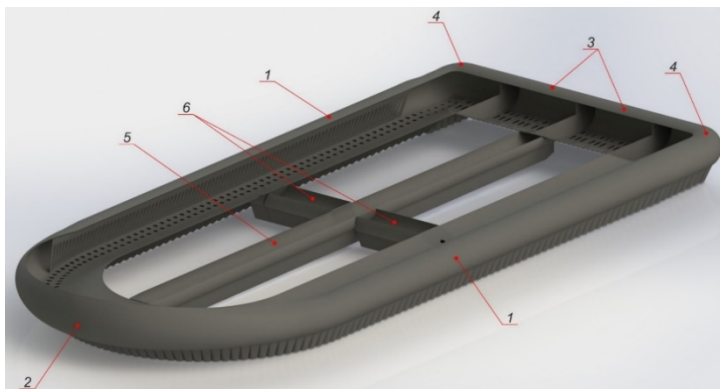


Рис. 2. Конструкция гибкого ограждения АПП "Марал":
1 – секции бортового ГО; 2 - носовое ГО; 3 – кормовое ГО; 4 –
угловые секции ГО; 5 – продольный киль внутреннего ГО; 6 –
поперечные кили правого и левого бортов внутреннего ГО

где n – количество емкостей в пневматической системе, описывающей ПК АПП "Марал"; $E q_i$ – i -е уравнение системы.

Дифференциальное уравнение неразрывности для i -ой емкости системы (рис. 4) записывается в виде:

$$E q_i \leftarrow \sum_{j=1}^n m_{ji} - \sum_{j=1}^n m_{ij} = W_i \frac{d\rho_i}{dt} + \rho_i \frac{dW_i}{dt}, \quad (2)$$

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 -ой емкости системы, м³; ρ_i – плотность воздуха в i -ой емкости системы, кг/м³.

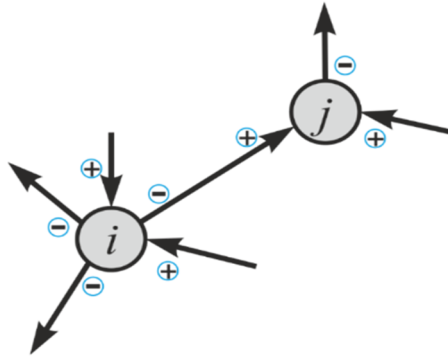


Рис. 4. Схематическое изображение пары объемов системы ПК АПП "Марал"

На рис. 3 знаками "-" и "+" обозначены знаки расходов воздуха, то есть исходящий из емкости воздух вычисляется со знаком "минус", а входящий – со знаком "плюс".

Массовый расход воздуха m_{ij} в направлении $i \rightarrow j$ определяется зависимостью:

$$m_{ij} = \rho_i Q_{ij}, \quad (3)$$

где Q_{ij} – объемный расход воздуха, м³/с,

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

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 вычислять его плотность ρ и наоборот.

Исходными данными и основными параметрами для прогнозирования расходов воздуха в ПК АПП "Марал" 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 .

Функция для вычисления плотности воздуха $\rho_{air}(P)$, кг/м³, от его избыточного давления P , Па, а также функция вычисления

избыточного давления воздуха от его плотности определяются следующими выражениями:

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

где $P_{atm} = 101325$ – атмосферное давление воздуха, Па; $K = 1,4$ – коэффициент;

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

где $\rho_{atm} = 1,225$ – плотность воздуха при атмосферном давлении, кг/м³.

Расчет выполняется в соответствии с алгоритмом:

подготовка исходных данных;

выполнение вычислений, относящихся к начальному моменту времени, t_0 ;

выполнение вычислений (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) вычисляются соответствующие плотности воздуха $[\rho_v]$. Далее в матрице $[P]$ задаются начальные избыточные давления для всех объемов подъемного комплекса и вычисляются соответствующие плотности воздуха $[\rho]$.

Затем заполняется матрица объемов $[W]$. В дальнейшем в ходе имитации часть элементов этой матрицы будет меняться, так как будет меняться форма и соответственно объем гибких ограждений (ГО) и секций ВП.

Также необходимо заполнить 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 вычислить начальные расходы воздуха: объемные – Q_{ij} ; массовые – m_{ij} .

Последним шагом, относящимся к вычислениям в начальный момент времени, является определение для каждой i -ой емкости производной dp_i/dt после преобразования к виду:

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

Для начального момента времени для всех емкостей принято, что $dW_i/dt = 0$. На этапе имитационного моделирования вначале принимается шаг интегрирования Δt . Затем, в принятом промежутке времени $[t_0; t_k]$, последовательно выполняются шаги имитационного моделирования.

Алгоритм выполнения каждого шага, следующий:

вычисление новых значений плотности воздуха в каждой емкости

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

вычисление новых значений давлений воздуха в каждой емкости

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

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

вычисление в соответствии с (3) новых значений массовых расходов воздуха m_{ij} ;

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

вычисление скоростей изменения объемов

$$\left[\frac{dW}{dt} \right];$$

определение в соответствии с (2) для каждой i -ой емкости нового значения производной dp_i/dt .

Предложенная методика прогнозирования расходов воздуха в подъемном комплексе амфибийных судов на воздушной подушке с помощью имитационного моделирования его работы в штатных режимах их эксплуатации и исследования мореходных качеств, а также комплекс математических моделей, позволяют с высокой точностью выполнять прогнозирование динамики СВПА и имитационное моделирование любых СВПА с 6-тью степенями свободы, что снизит расходы на проектирование и постройку головного СВПА с точно предсказуемыми мореходными качествами и эксплуатационными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА
REFERENCES

1. Зайцев Д.В. Исследование процесса затягивания носового гибкого ограждения без диафрагмы при эксплуатации судна на воздушной подушке на тихой воде / Зайцев Д.В., Зайцев В.В. // 36. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, – 2008. – № 5 (422). – С. 37 – 41.
2. Зайцев Д.В. Расчет гибкого ограждения с учетом его затягивания в режиме движения судна на воздушной подушке // 36. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, – 2006. – № 4 (409). – С. 32 – 40.
3. Кользаев Б.А. Справочник по проектированию судов с динамическими принципами поддержания / Кользаев Б.А., Косоруков А.И., Литвиненко В.А. – Л.: Судостроение, 1980. – 472 с.
4. Бенуа Ю.Ю. Основы теории судов на воздушной подушке / Ю.Ю. Бенуа, В.К. Дьяченко, Б.А. Кользаев, В.А. Литвиненко, И.В. Озимов, С.А. Смирнов. – Л.: Судостроение, 1970. – 456 с.
5. Зайцев Д.В., Зайцев В.В., Зайцев Вал.В. Математическая модель кормового рессорного гибкого ограждения СВПА // Інновації в суднобудуванні та океанотехніці // Матеріали VI Міжнародної науково-технічної конференції присвяченої 95-річчю Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова. – Миколаїв: НУК, 2015. – С. 291 – 293.
6. Dmytro Zaytsev, Volodymyr Zaytsev, Pentscho Pentshev. Design Methods of Small Hovercrafts // Black sea 2014: Twelfth international conference on marine sciences and technologies. – Varna, Bulgaria: Varna Scientific and Technical Unions – Varna, – 2014. – P. 107 – 108.
7. Зайцев В.В., Зайцев Вал.В., Лукашова В.В., Лысый А.А. Имитационное моделирование подъемного комплекса судна на воздушной подушке скегового типа в режиме висения без хода // 36. наук. праць НУК. – Миколаїв: НУК, 2015. – № 2 (458). – С. 12 – 16.
8. Зайцев В.В., Зайцев Вал.В., Зайцев Д.В., Лукашова В.В. Прогнозирование динамики и мореходных качеств амфибийных судов на воздушной подушке // Автоматизація суднових технічних засобів: наук.-техн. зб. 2021. – Вип. 27. – Одеса: НУ "ОНМА". – С. 22 – 32. DOI:10.31653/1819-3293-2021-1-27-22-32.

Анотація – Існують різні методики та теорії проектування окремих елементів підйомного комплексу, в основному різних типів гнучких огорожень підйомного комплексу. Однак проектування гнучких огорожень не може проводитися без урахування взаємного

впливу всіх елементів системи, що беруть участь у забезпеченні підйому та руху амфібійних суден на повітряній подушці (СППА) над водною поверхнею. Основні елементи цієї системи – корпус судна, рушії, підйомний комплекс, який включає носове гнучке огородження (НГО), кормове гнучке огородження (КГО), бортові гнучкі огородження (БГО), внутрішнє ГО (подовжній та поперечні кили), нагнітач ПП, що забезпечують подачу повітря в повітряну подушку та ресивери ГО, повітроводні канали. Залежно від величини надлишкового тиску повітря в повітряній подушці, зазорів між гнучким огородженням та водною поверхнею змінюється витрата повітря і відповідно потужність і продуктивність нагнітачів, змінюються надлишкові тиски в ресиверах КГО, НГО, БГО та внутрішнього ГО, змінюється їх форма та напружено-деформований стан. Зміна форми гнучкого огородження призводить до зміни посадки СППА і змінюється швидкість його руху.

У роботі представлено методику прогнозування витрат повітря у підйомному комплексі СППА за допомогою імітаційного моделювання його роботи у штатних режимах їх експлуатації та дослідження морехідних якостей. Розглянуто прогнозування роботи підйомного комплексу автомобільно-пасажирського порома (АПП) на повітряній подушці амфібійного типу "Марал". Розглянуто систему диференціальних рівнянь нерозривності витрат повітря на ПК АПП "Марал", що визначають його стан у кожний момент часу. Наводиться функція для обчислення густини повітря від його надлишкового тиску, а також функція обчислення надлишкового тиску повітря від густини. Представлена математична модель, втілена у програму, дозволяє поглиблено аналізувати динаміку та морехідні якості СППА до завершення їх проектування та до початку будівництва. Розроблено алгоритм прогнозування витрат повітря у підйомному комплексі СППА у штатних режимах їх експлуатації та дослідження морехідних якостей.

Описана методика прогнозування витрат повітря в підйомному комплексі СППА за допомогою імітаційного моделювання його роботи в штатних режимах їх експлуатації та дослідження морехідних якостей, а також комплекс математичних моделей дозволяють з високою точністю виконувати прогнозування динаміки СППА та імітаційне моделювання будь-яких СППА з 6-ма ступенями свободи, що знизить витрати на проектування та будівництво головного СППА з точно передбачуваними морськими якостями та експлуатаційними характеристиками.

Annotation – There are various methods and theories for designing individual elements of the lifting complex, mainly various types of flexible skirts for the hovercraft lifting complex. However, the design of flexible skirts cannot be carried out without taking into account the mutual influence of all elements of the system involved in ensuring the rise and movement of hovercraft above the water surface. The main elements of this system are the ship's hull, propellers, lifting complex, which includes a bow flexible skirt, aft flexible skirt, side flexible skirts, an inner flexible skirt (longitudinal and transverse keels), air cushion blowers that supply air to the air cushion and skirt flexible receivers, air ducts. Depending on the amount of excess air pressure in the air cushion, the gaps between the flexible skirt and the water surface, the air flow rate and, accordingly, the power and performance of the blowers change, the excess pressures in the receivers of the aft flexible skirt, the bow flexible skirt, the side flexible skirt, and the inner flexible skirt change, their shape and stress-strain state change. Changing the shape of the flexible skirt leads to a change in the landing of the hovercraft and, accordingly, the speed of its movement changes.

The paper presents a method for predicting air flow in the hovercraft lifting complex using simulation modeling of its operation in normal modes of their operation and the study of seaworthiness. The forecasting of the operation of the lifting complex of the car-passenger amphibious hovercraft "Maral" is considered. The system of differential equations for the continuity of air flow rates in the hovercraft "Maral", which determine its state at each moment of time, is considered. A function is provided for calculating the air density from its excess pressure, as well as a function for calculating the excess air pressure from its density. The presented mathematical model, embodied in the program, allows in-depth analysis of the dynamics and seaworthiness of hovercrafts before the completion of their design and before the start of construction. An algorithm has been developed for predicting air flow in the lifting complex of hovercrafts in their normal operating modes and studying seaworthiness.

The described method for predicting air flow in the lifting complex of hovercrafts using simulation modeling of its operation in normal modes of their operation and the study of seaworthiness, as well as a set of mathematical models, make it possible to predict the dynamics of hovercrafts with high accuracy and simulation modeling of any hovercrafts with 6 degrees of freedom, which will reduce the cost of designing and building a head hovercraft with precisely predictable seaworthiness and performance.