Оптимизация параметров несущей системы амфибийного транспортного средства на воздушной подушке

© В.Н. Наумов¹, А.С. Меньшиков², А.С. Кудрявцев³,
А. А. Долгополов², Ю. Ю. Мерзликин²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²ФГУП «ЦАГИ», НИМК ЦАГИ, Москва, 105005, Россия

³ЦКБ «Нептун», Санкт-Петербург, 198096, Россия

Приведены результаты статических и буксировочных испытаний в опытовом бассейне НИМК ЦАГИ на твердой и водной поверхностях динамически подобной модели амфибийного транспортного средства на воздушной подушке (ТСВП). Получены оптимальные параметры формы гибкого ограждения, значения потребного расхода воздуха на создание воздушной подушки (ВП) и диапазона центровки, при которых обеспечивается приемлемая остойчивость ТСВП на твердой и водной поверхностях по крену и тангажу (дифференту) в процессе движения с углами рыскания (дрейфа) до 30°, минимизированы расход воздуха и гидродинамическое сопротивление ТСВП на крейсерской скорости и скорости горба сопротивления с сохранением устойчивости формы гибкого ограждения к подлому и затягиванию при движении по водной поверхности. Решена задача обеспечения остойчивости ТСВП по крену и тангажу без применения продольного и поперечного секционирования зоны ВП с помощью гибких ограждений, располагаемых на днище ТСВП во внутренней области ВП.

Ключевые слова: амфибия, транспортное средство, воздушная подушка, остойчивость, буксировочные испытания, гидродинамическое сопротивление.

Статическим и буксировочным испытаниям в опытовом бассейне НИМК ЦАГИ на твердой и водной (гладкой и взволнованной) поверхностях была подвергнута динамически подобная модель амфибийного транспортного средства на воздушной подушке (ТСВП) массой 5,5 т с воздушной подушкой (ВП), имеющей длину и ширину по нижним кромкам гибкого ограждения соответственно $L_{\Pi} = 9,4$ м и $B_{\Pi} = 4,6$ м. Носовая часть ТСВП в плане по нижним кромкам гибкого ограждения выполнена по радиусу $R = B_{\Pi}/2$. Расчетный расход воздуха двух вентиляторов на создание ВП составляет $Q_{\Pi} = 13 \text{ м}^3/\text{с}$. Модель ТСВП выполнена в масштабе $A = l_{\Pi}/l_{\text{м}} = 3,96$ ($l_{\Pi}, l_{\text{м}}$ — характерные размеры натурно объекта и модели ТСВП). Подобие модели натурному объекту обеспечивалось выполнением критерия Фруда $Fr = V / \sqrt{g L_{\Pi}}$ (V — скорость движения; g — ускорение свободного падения), в соответствии с которым кроме геометрического подобия соблюдались соотношения масс $m_{\text{м}} = m_{\Pi}/A^3$, избыточных давлений в ВП $p_{\text{м}} = p_{\Pi}/A$ и расходов воздуха вентиляторов на создание ВП $Q_{\text{м}} = Q_{\Pi}/A^{5/2}$. Буксировка модели

осуществлялась за аэродинамическим щитом (рис. 1), что позволило исключить воздействие на модель аэродинамических сил и моментов, а также сил и моментов от набегающего потока, обусловленных импульсным сопротивлением воздуха на входе в вентиляторы ВП.

Рис. 1. Модель на штанге буксировочной тележки в процессе движения по водной поверхности за аэродинамическим щитом

Максимальные скорости буксировки модели по гладкой и взволнованной водным поверхностям соответствовали значениям числа Фруда $Fr = 2,45$ и $1,78$ (для натурального ТСВП они равны значениям скорости 78 и 57 км/ч).

Цель испытаний состояла в поиске оптимальных параметров формы гибкого ограждения, потребного расхода воздуха на создание ВП и диапазона центровки (взаимного расположения в продольном направлении геометрического центра давления и центра масс ТСВП), при которых будет обеспечена приемлемая остойчивость ТСВП на твердой и водной поверхностях по крену и тангажу (дифференту) в процессе движения с углами рыскания до 30° и минимизированы расход воздуха и гидродинамическое сопротивление ТСВП на крейсерской скорости и скорости горба сопротивления с сохранением устойчивости формы гибкого ограждения к подлôму и затягиванию под днище.

Чтобы уменьшить трудоемкость обслуживания гибкого ограждения ВП в процессе эксплуатации ТСВП (например, при замене поврежденных или изношенных элементов ограждения), была поставлена задача обеспечить остойчивость ТСВП по крену и тангажу без продольного и поперечного секционирования зоны ВП с помощью гибких ограждений, располагаемых на днище ТСВП во внутренней области ВП.

В результате расчетных и экспериментальных исследований при варьировании геометрических параметров ограждения по периметру ВП, значений расхода воздуха на создание ВП и центровки ТСВП было принято решение установить по периметру ВП модели баллонное ограждение с различными по конструкции навесными элемента-

ми (рис. 2–4). Избыточное давление в полости баллона, сообщающейся с ВП, равно давлению в ВП.

Рис. 2. Носовое и бортовое гибкое ограждение ВП

В носовой и бортовых частях ВП на баллоне закреплены съемные открытые сегментные элементы. Для обеспечения приемлемой остойчивости ТСВП по крену и тангажу (дифференту) образующие элементов носового и бортового гибкого ограждения имеют меньший угол наклона к опорной поверхности, чем при формировании ВП с дополнительными секционирующими ограждениями. В соответствии с предложенной схемой остойчивость обеспечивается значительным увеличением площади ВП в результате обжатия элементов гибкого ограждения со стороны наклоненной части корпуса ТСВП [1–3].

Кормовые элементы выполнены в виде сообщающихся с полостью баллона замкнутых конусных проточных элементов с ластами в нижней части, исключающими попадание воды в элементы при движении ТСВП вперед (см. рис. 3). Похожая конструкция кормовых элементов, разработанная фирмой HDL (США), применяется на малых ТСВП западного производства. Однако эта конструкция потребовала доводки и оптимизации. Чтобы избежать проявляющегося на скорости горба сопротивления значительного роста сопротивления движению от бульдозерного эффекта кормовых элементов (в результате деформации внутренних частей элементов под действием водной поверхности, возмущенной от импульса ВП), внутри полости ВП перед кормовыми элементами был закреплен фартук, полностью закрывающий кормовые элементы по всей ширине модели. При движении ТСВП вперед нижняя часть фартука отделяет поверхность воды от навесных кормовых элементов, препятствует развитию деформации их внутренних стенок и проявлению бульдозерного эффекта.

Рис. 3. Схемы кормового (а), бортового (б) и носового (в) гибкого ограждения ВП:

1 — баллон; 2 — корпус модели; 3 — область ВП; 4 — опорная поверхность; 5 — элемент ограждения; 6 — основная плоскость; 7 — ласта элемента; 8 — фартук; 9 — эластичная растяжка

Остойчивость на водной поверхности ТСВП по тангажу (дифференцу) ϑ и крену γ оценивается производными продольного и поперечного моментов M_z и M_x : $\partial M_{zn} / (\partial \vartheta) = -5630 \text{ Н} \cdot \text{м/град}$ и $\partial M_{xn} / (\partial \gamma) = -1100 \text{ Н} \cdot \text{м/град}$. На твердой поверхности остойчивость по тангажу (дифференцу) и крену оценивается производными $\partial M_{zn} / \partial \vartheta = -8848 \text{ Н} \cdot \text{м/град}$ и $\partial M_{xn} / \partial \gamma = -1810 \text{ Н} \cdot \text{м/град}$.

Рис. 4. Кормовое гибкое ограждение ВП

Буксировочные испытания модели на гладкой воде за аэродинамическим щитом свидетельствуют о том, что при расчетном расходе воздуха в ВП $Q_n = 13 \text{ м}^3/\text{с}$ наиболее высокое гидродинамическое качество ТСВП, характеризуемое коэффициентом $K = Y_n / X_r$ (Y_n — подъемная сила ВП; X_r — сопротивление движению ТСВП), на скорости горба сопротивления $V \approx 22 \text{ км/ч}$ имеет место при кормовых центровках, соответствующих начальным углам тангажа (дифферента) ТСВП на плаву $0 \dots 1^\circ$ (рис. 5). При скоростях движения $V \geq 30 \dots 35 \text{ км/ч}$ гидродинамическое качество ТСВП повышается. В диапазоне значений $V \geq 55 \dots 78 \text{ км/ч}$ коэффициент $K \approx 32$ и гидродинамическое качество практически не зависит от центровки ТСВП (по крайней мере, в диапазоне значений начальных углов тангажа (дифферента) $-1 \dots +1^\circ$).

На взволнованной водной поверхности при длине и высоте волны соответственно $l_{в.н} = 2L_{п.н}$ и $h_{в.н} = 0,2 \text{ м}$ осредненное значение $K \approx 15,3$ при скорости движения $22 \dots 36 \text{ км/ч}$, а при скоростях движения $40 \dots 57 \text{ км/ч}$ $K \approx 16,4$ (рис. 6). Перегрузка в центре масс модели при этом не превышает $0,7g$.

Рис. 5. Результаты буксировочных испытаний модели ТСВП на гладкой воде, пересчитанные для натурального объекта массой 5,5 т (X_a — аэродинамическое сопротивление; X_r — гидродинамическое сопротивление; X_i — импульсное сопротивление воздуха на входе в вентиляторы ВП; $X_{\text{сумм}}$ — суммарное сопротивление) при трех значениях расхода Q_n воздуха вентиляторов

Рис. 6. Результаты буксировочных испытаний модели ТСВП на взволнованной водной поверхности, пересчитанные для натурального объекта массой 5,5 т (X_a — аэродинамическое сопротивление; X_r — гидродинамическое сопротивление; X_i — импульсное сопротивление воздуха на входе в вентиляторы ВП; $X_{\text{сумм}}$ — суммарное сопротивление) при расчетном расходе воздуха $Q_n = 13 \text{ m}^3/\text{s}$

С увеличением расхода воздуха на создание ВП примерно от 12 до 16 м³/с гидродинамическое сопротивление движению при скорости горба сопротивления остается практически неизменным (уменьшается лишь на 2 %), при скорости $V \geq 50$ км/ч уменьшается на 12 %.

При буксировке модели как по гладкой водной поверхности (до скорости $V_{\max}$, соответствующей числу Фруда $Fr = 2,45$; для ТСВП $V_{\max} = 78$ км/ч), так и по взволнованной водной поверхности (до скорости $V_{\max}$, соответствующей числу Фруда $Fr = 1,78$; для ТСВП $V_{\max} = 57$ км/ч), элементы гибкого ограждения сохраняют свою форму (не затягиваются под днище ТСВП). При буксировке модели с углами рыскания до $\psi = \pm 30^\circ$ (при больших значениях угла ψ испытания не проводились) она обладает достаточным запасом остойчивости.

Исследование влияния формы нижней кромки кормовых элементов на сопротивление движению модели показало, что подрезка внешней образующей элементов гибкого ограждения способствует повышению гидродинамического качества: при крейсерской скорости значение K увеличивается на 6,5 %, а при скорости горба гидродинамического сопротивления — на 4,6 % (рис. 7). При этом угол тангажа на скорости горба сопротивления возрастает от 1,6 до 2°, а на крейсерской скорости увеличивается от 0 до 1° [4, 5].

Рис. 7. Схема подрезки кормового гибкого ограждения ВП:

а — исходный кормовой элемент; *б* — кормовой элемент с подрезкой (*1* — корпус модели; *2* — область ВП; *3* — контрольная линия; *4* — опорная поверхность; *5* — основная плоскость)

Таким образом, ТСВП с разработанной системой формирования ВП будет обладать следующими характеристиками:

- приемлемой продольной и поперечной остойчивостью при движении как по гладкой, так и по взволнованной водной поверхности с углами рыскания до 30° ;
- высоким гидродинамическим качеством при движении по гладкой воде: на скорости горба сопротивления $K \approx 18$, на крейсерской скорости $K \approx 32$;

- достаточно высоким гидродинамическим качеством при движении по взволнованной водной поверхности ($K \approx 14,5$);
- устойчивостью элементов ограждения к замыву и затягиванию под днище ТСВП;
- допустимым уровнем максимальных перегрузок при движении по взволнованной поверхности (до $0,7g$).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Короткин И.М. *Аварии судов на воздушной подушке и подводных крыльях*. Ленинград, Судостроение, 1981, 215 с.
- [2] Бенуа Ю.Ю., Дьяченко В.К. и др. *Основы теории судов на воздушной подушке*. Ленинград, Судостроение, 1970, 456 с.
- [3] Злобин Г.П., Симонов Ю.А. *Суда на воздушной подушке*. Ленинград, Судостроение, 1971, 212 с.
- [4] Честнов Е.И. *Зарубежные суда на воздушной подушке. Труды ЦНИИЭВТ*. Выпуск 117 Москва, Транспорт, 1975, 144 с.
- [5] Терещевский В.Н., Волков Л.Д., Короткин А.И. *Аэродинамический эксперимент в судостроении*. Ленинград, Судостроение, 1976, 190 с.

Статья поступила в редакцию 03.10.2014

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Наумов В.Н., Меньшиков А.С., Кудрявцев А.С., Долгополов А. А., Мерзликин Ю. Ю. Оптимизация параметров несущей системы амфибийного транспортного средства на воздушной подушке. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2014, вып. 11.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/transport/1299.html>

Наумов Валерий Николаевич — д-р техн наук, профессор, заведующий кафедрой «Многоцелевые гусеничные машины и мобильные роботы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Президента РФ, специалист в области проектирования и расчета транспортных систем.
e-mail: naumovvn@yandex.ru

Меньшиков Алексей Сергеевич — инженер отдела № 2 НИО-12 ФГУП ЦАГИ, специалист в области аэродинамики летательных аппаратов. e-mail: lyoshamenshikov@yandex.ru

Кудрявцев Александр Сергеевич — канд. техн. наук, главный конструктор ЦКБ «Нептун», специалист в области проектирования амфибийных транспортных средств. e-mail: koudr@list.ru

Долгополов Александр Андреевич — старший научный сотрудник ФГУП ЦАГИ, специалист в области динамики летательных аппаратов и транспортных средств на воздушной подушке; стационарной и нестационарной аэродинамики летательных аппаратов.
e-mail: dolgopolov.aviafgup@gmail.com

Мерзликин Юрий Юрьевич — главный инженер НИО-12 ФГУП ЦАГИ, специалист в области стационарной и нестационарной аэродинамики летательных аппаратов. e-mail: ymerzlikin@gmail.com

Bearing system parameter optimization of the amphibian air-cushion vehicles

© V.N. Naumov¹, A.S. Menshikov², A.S. Koudryavtzev³,
A.A. Dolgoplov², Yu.Yu. Merzlikin²

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

² Central Aerohydrodynamic Institute, NIMK TsAGI, Moscow, 105005, Russia

³ CKB "Neptun", St. Petersburg, 198096, Russia

The article presents results of static and towage tests in experimental pool on solid and water surfaces of a dynamic similar model of amphibian air-cushion vehicle. The aim of the tests was the search for optimal parameters of air-cushion vehicle, such as: form of flexible fence; air flow rate in air-cushion system; centring (mutual position of gravity and pressure centres); trim and list stability on water and solid surfaces; minimized motion resistance. This aim is to be achieved without dividing air cushion area on long and cross sections. It reduces labour-intensiveness of maintenance work. As a result of research the aim was achieved.

Key words: *amphibian, vehicle, air-cushion, stability, towage test, hydrodynamic resistance.*

REFERENCES

- [1] Korotkin I.M. *Avarii sudov na vozdushnoy podushke I podvodnykh krylyakh* [Accidents on hovercraft and hydrofoils]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1981, 215 p.
- [2] Benoit Yu.Yu., Dyachenko V.K., et al. *Osnovy teorii sudov na vozdushnoy podushke* [Fundamentals of the theory of the hovercraft]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1970, 456 p.
- [3] Zlobin G.P., Simonov Yu.A. *Suda na vozdushnoy podushke* [Hovercraft]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1971, 212 p.
- [4] Chestnov E.I. *Zarubezhnye suda na vozdushnoy podushke* [Foreign hovercraft]. *Trudy TsNIIET* — Proceedings of CNIIMF, iss. 117 Moscow, Transport Publ., 1975, 144 p.
- [5] Tereshevsky V.N., Volkov L.D., Korotkin A.I. *Aerodinamicheskiy experiment v sudostroenii* [Aerodynamic experiment in shipbuilding]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1976, 190 p.

Naumov V.N. (b. 1941) graduated from Bauman Moscow State Technical University in 1965. Dr. Sci. (Eng.), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation. Head of the Tracked Vehicle and Mobile Robots Department at Bauman Moscow State Technical University. Author of 300 publications in the field of transport machinery. e-mail: naumovvn@yandex.ru

Menshikov A.S., an engineer of the Department no. 2 at the Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI). Specialist in aircraft aerodynamics. e-mail: lyoshamenshikov@yandex.ru

Kudryavtsev A.S., Ph.D., chief designer of Neptune Central Designing Department. Specialist in the field of designing amphibious vehicles. e-mail: koudr@list.ru

Dolgopolov A.A., a senior researcher in the Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI). Specialist in the field of dynamics of aircraft and, air-cushion vehicles, steady and unsteady aerodynamics of aircraft. e-mail: dolgopolov.aviafgup@gmail.com

Merzlikin Yu.Yu., chief engineer in the Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI). Specialist in the field of stationary and nonstationary aerodynamics of aircraft. e-mail: ymerzlikin@gmail.com