

МАЙБОРОДА О.М., головний науковий співробітник, доктор технічних наук, професор

КОВАЛЕНКО Т.І., науковий співробітник Центрального науково-дослідного інституту озброєння та військової техніки Збройних Сил України

МОДЕЛЮВАННЯ ХОДОВОЇ ПОСАДКИ КОРПУСІВ ГІДРОЛІТАКІВ

Розглянуто особливості ходової посадки, яка суттєво впливає на опір глісируючих корпусів гідролітаків. Надано рекомендації щодо моделювання повної системи сил при буксирувальних випробуваннях і математичному моделюванні гідродинаміки таких корпусів

Для оцінки пропульсивних характеристик глісируючих корпусів гідролітаків насамперед потрібно знати опір рухові, що визначається формою, посадкою, тобто положенням корпусу відносно вільної поверхні води, швидкістю літака та її напрямком, а також зовнішніми умовами руху: глибиною та шириною фарватеру, вітром, хвилюванням, течією тощо. При розрахунках динаміки основним є визначення опору корпусу при його русі вздовж площини симетрії із постійною швидкістю на глибокій воді за відсутності хвиль, вітру та течії.

Опором рухові корпусу гідролітака по воді називають проекцію діючих гідроаеродинамічних сил на напрямок швидкості його руху. При цьому аеродинамічні сили (опір і піднімальна сила планеру) звичайно моделюються та розраховуються окремо. Отже в подальшому будемо розглядати лише гідродинамічні сили на змоченій частині корпусу, що спричиняють найбільш важливу складову загального опору при глісируванні. Буксирувальним називають опір ізольованого (тобто за відсутності штатного рушія) корпусу.

Залежно від швидкості ходу та водотоннажності гідролітака можливі різні режими його руху на воді [1].

На *режимі плавання* сила ваги літака практично повністю врівноважується гідростатичною силою підтримання, і осадка корпусу залишається статичною. Моменти сил опору та упору рушіїв є незначними, отже і диферент корпусу не змінюється. Цей режим має місце, якщо число Фруда за водотоннажністю

$Fr_V = \frac{v}{\sqrt{g^3 V}} < 1$, де v – швидкість руху, м/с; g – прискорення вільного падіння,

м/с²; V – об'ємна водотоннажність, м³.

У *перехідному режимі* при $1 < Fr_V < 3$ на корпусі виникає вертикальна гідродинамічна сила (гідродинамічне підтримання), що змінює його посадку (середню осадку і диферент) і опір руху.

В зоні $Fr_V > 3$ має місце *режим глісирування*, коли гідродинамічна піднімальна сила наближається до сили ваги літака, що суттєво змінює його посадку. Вирішальним фактором визначення гідродинамічного опору корпусу для

цього режиму стає ходова посадка, що при заданій швидкості ходу визначається балансуванням діючих на корпус сил і моментів. Тому для розрахунку гідродинамічного опору гідролітаків та при випробуваннях відповідних моделей необхідно враховувати та моделювати повну систему діючих на корпус сил, зокрема і сили тяги двигунів.

За припущенням симетричності корпусу гідролітака та його прямого руху на спокійній воді рівнодіючі усіх видів сил на корпусі розташовані у площині його симетрії, тобто можна розглядати рух корпусу як плоскопаралельний під дією плоскої системи сил (рис. 1).

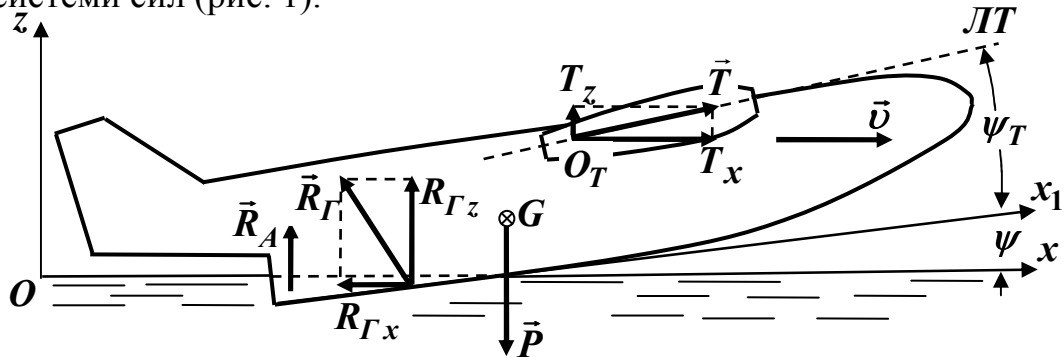


Рис. 1. Система сил на корпусі гідролітака

На рис. 1 зв'язана із корпусом вісь x_1 є паралельною статичній ватерлінії; вісь x швидкісної системи координат xOz спрямовано вздовж незбуреної вільної поверхні води; \vec{v} – швидкість гідролітака; \vec{P} – сила ваги; \vec{R}_G , R_{Gx} , R_{Gz} – рівнодійна гідродинамічних сил та її проєкції (R_{Gx} – загальний опір руху, R_{Gz} – сила гідродинамічного підтримання); \vec{R}_A – гідростатична сила підтримання; G – центр мас літака; LT – лінія тяги двигуна (або умовна проєкція на площину симетрії ліній тяги двигунів); O_T – умовна точка прикладення тяги двигуна; \vec{T} , T_x , T_z – вектор тяги двигуна та його проєкції; ψ – кут ходового диференту; ψ_T – установочний кут нахилу лінії тяги.

Склад наведеної на рис. 1 системи сил залежить від режиму руху гідролітака. На режимі плавання практично відсутні складова R_{Gz} і кут ψ ходового диференту. На перехідному режимі руху та глісеруванні присутні усі наведені сили.

Розглянемо сучасний стан визначення буксирувального опору корпусів гідролітаків.

1. Традиційним методом є фізичне моделювання, що полягає у випробуванні моделей в дослідному басейні з подальшим перерахуванням отриманого опору на натуру. Цей метод, що був розроблений В.Фрудом понад 130 років тому, використовує наближене моделювання, але після численних доробок і доповнень досі є найбільш точним і розповсюдженим при проектуванні корпусів суден і гідролітаків [1].

Буксирувальні модельні випробування у перехідному режимі і при глісеруванні мають суттєві особливості. Зокрема в басейні неможливо забезпечити подібність по числу Вебера, що моделює бризковий опір [2], отже зростає масштабний ефект при перерахунку опору на натуру і обмежуються мінімальні розміри моделі. Аеродинамічна складова опору корпусу у басейні не моделюється

внаслідок значно менших чисел Рейнольдса, і звичайно моделі буксують за аеродинамічним щитом. Це порушує подібність ходової посадки і, відповідно, гідродинамічного опору. Відмінністю буксирувальних модельних випробувань є необхідність відтворення на моделі вектора тяги двигуна, що може впливати на ходову посадку і гідродинамічний опір моделі [1, 2].

Порівняємо системи сил, що діють на корпус гідролітака із штатним двигуном та при його буксируванні. Для зручності будемо розглядати натурний літак, але, звісно, отримані результати повністю стосуються проведення модельних випробувань. Для тіл із зосередженою рушійною силою природно обрати як центр зведення сил точку прикладення такої сили: для літака із штатним рушієм – умовну точку O_T у площині симетрії, а при буксируванні – точку прикладення буксирувальної сили.

Зведемо сили гідромеханічної природи і ваги, що діють на корпус гідролітака із штатним двигуном, до умовної точки O_T прикладення тяги двигуна (рис. 2). Головний вектор \vec{R} цих сил врівноважується вектором \vec{T} тяги двигуна, а головний момент за умови поступального руху літака дорівнює нулю.

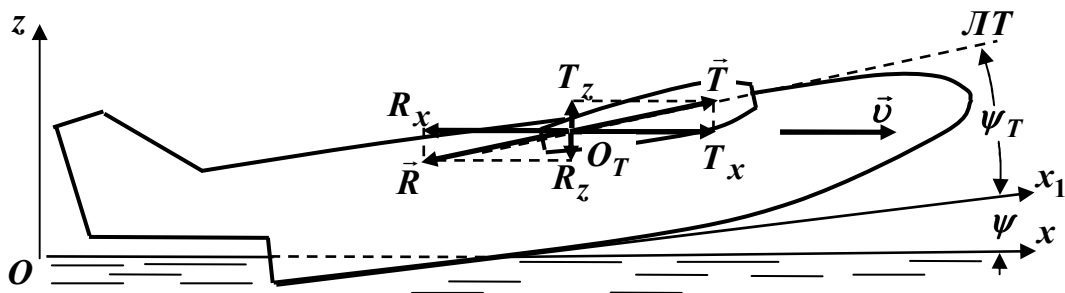


Рис. 2. Зведення системи сил на корпусі гідролітака із штатним двигуном

Необхідність збереження в умовах буксирувальних випробувань ходової посадки і величини опору корпусу гідролітака, що він має при русі із штатним рушієм, передбачає збереження головного вектора і головного моменту тієї ж системи діючих на корпус сил гідромеханічної природи і ваги, зведених до точки прикладення буксирувальної сили. Згідно з рекомендаціями ІТТС (International Towing Tank Conference) [3] при буксирувальних випробуваннях рушійна сила прикладається на лінії тяги у точці K з абсцисою центра мас (рис. 3). Розглянемо можливість збереження ходової посадки і опору корпусу гідролітака в умовах його буксирування згідно з рекомендаціями ІТТС.

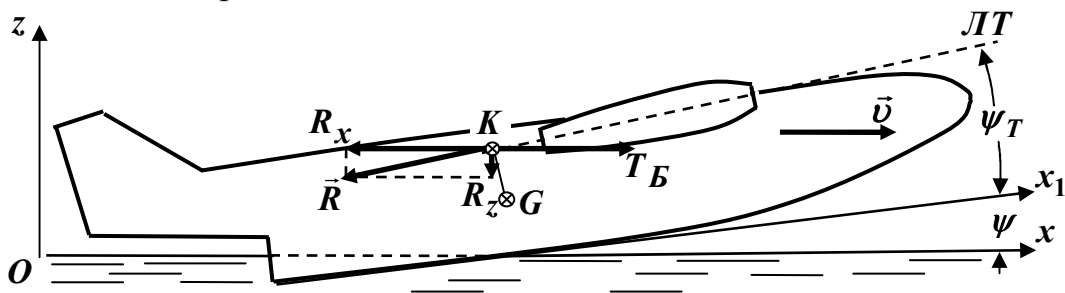


Рис. 3. Зведення системи сил на корпусі гідролітака до точки прикладення буксирувальної сили згідно рекомендацій ІТТС [3]

На рис. 3 показано переміщення до точки K , де прикладена буксирувальна сила T_B , головного вектора і головного моменту діючих на корпус сил. Буксирувальна сила T_B за модулем має дорівнювати горизонтальній складовій R_x , тобто опору корпусу.

Як відомо [4], головний вектор системи сил є інваріантним відносно центра зведення, а при переміщенні центра зведення вздовж прямої, що має напрямок головного вектора, головний момент залишається незмінним як по модулю, так і за напрямком. Тому зведення згідно рекомендаціям ІТТС системи діючих сил до точки K на лінії тяги мало б не порушувати посадку і опір корпусу, якщо б ця система сил залишалась врівноваженою. Але, як можна бачити на рис. 3, головний вектор \vec{R} не врівноважується буксирувальною силою T_B , і при заміні вектора \vec{T} тяги штатного двигуна буксирувальною силою буде змінюватись рух гідролітака, його посадка та, як наслідок, опір. Отже буксирувальні випробування моделей гідролітаків згідно рекомендаціям ІТТС не забезпечують подібності ходової посадки і опору.

Можна очікувати, що у порівнянні із параметрами руху із штатним двигуном при буксируванні корпусу гідролітака з тією ж швидкістю збільшиться його середня осадка, зросте коефіцієнт статичного навантаження і залежно від числа Фруда Fr_V опір зросте у перехідному режимі і зменшиться при глісируванні [1]. Відносна похибка визначення опору при цьому залежить від установочного кута нахилу лінії тяги двигуна, ходового диференту, числа Фруда Fr_V і оберненої якості корпусу гідролітака.

При необхідності виправлення наведеної невідповідності можна запропонувати використати вертикальне розвантаження моделі у точці K її підвіски силою

$$T_{B_z}^M = T_B^M \cdot \operatorname{tg}(\psi^M + \psi_T),$$

де T_B^M – експериментальне значення величини буксирувальної сили моделі; ψ_T – установочний кут нахилу лінії тяги двигуна; ψ^M – експериментальне значення кута диференту моделі.

Оскільки буксирувальна сила T_B^M і кут ψ^M диференту вимірюються у процесі експерименту, то величину сили $T_{B_z}^M$ можна послідовно розраховувати і виконувати відповідне розвантаження, використовуючи ітераційний алгоритм у серії експериментів, коли на першому випробуванні приймається $T_{B_z}^M = 0$ і на кожному подальшому сила розраховується по значенням T_B^M і ψ^M із попереднього.

2. В останні роки набуло поширення математичне моделювання складних течій рідини, що дозволяє враховувати дійсні фізичні властивості руху без недоліків масштабного ефекту фізичного моделювання. Серед численних запропонованих методів математичного моделювання гідродинамічних характеристик суден і корпусів гідролітаків найбільш ефективною і розповсюдженою є група методів CFD (Computer Fluid Dynamics), що використовують чисельний розв'язок рівнянь Нав'є-

Стокса і примежового шару, а також моделювання хвильового опору. До цієї групи належить сучасний програмний комплекс FlowVision компанії ТЕСИС (Росія, Москва), що, зокрема, застосовується провідними проектно-дослідницькими установами (Зеленодольське ПКБ і Таганрогський авіаційний науково-технічний комплекс (ТАНКТ) ім. Г.М.Берієва, Росія; підприємство Digital Marine Technology, Україна, Одеса).

Відомі приклади моделювання гідродинаміки швидкісних кораблів і корпусів гідролітаків, виконаного у наведених установах, показують, що в жодному не враховується вектор упору рушія або тяги двигуна. Діюча система сил зводиться до центру мас і фактично моделюється режим “сухого” буксирування з “підвішенням” корпусу в цій точці (рис. 4). Позначення на рис. 4 відповідають прийнятим на попередніх рисунках.

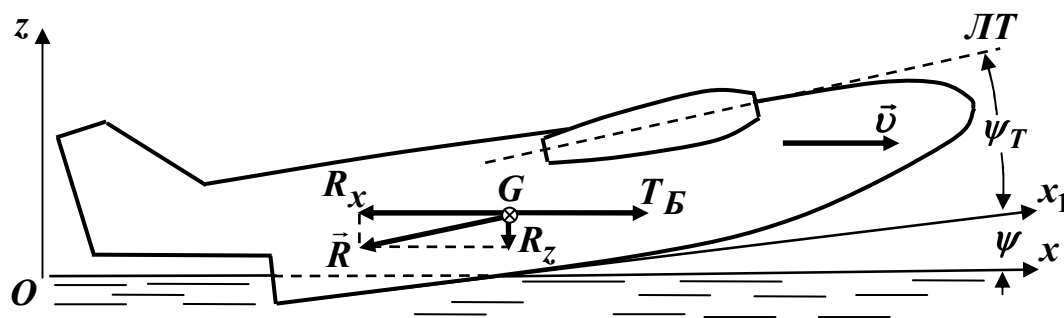


Рис. 4. Зведення системи сил при математичному моделюванні гідродинаміки корпусу гідролітака

Очевидно, що і в цьому випадку головний вектор \vec{R} системи сил гідромеханічної природи і ваги, що визначає ходову посадку і опір корпусу гідролітака із штатним рушієм, не врівноважується розрахунковою буксирувальною силою. Тому ходова посадка і опір математичної моделі не відповідатимуть дійсним характеристикам руху корпусу гідролітака із штатним рушієм. До того ж, на відміну від буксирувальних випробувань згідно рекомендаціям ІТТС, при математичному моделюванні дійсний центр O_T зведення сил переміщується не в напрямку головного вектора \vec{R} і виникає додатковий диферентуючий момент, що дорівнює моменту вектора \vec{R} , прикладеного у точці O_T , відносно центра мас. Отже математичне моделювання без урахування вектора тяги двигуна не визначає дійсної ходової посадки та опору моделі.

Програмний комплекс FlowVision дозволяє ввести у вихідних даних величину коректуючого моменту при розрахунку динаміки руху моделі. Таким чином було введено сталий момент вектора тяги двигуна при моделюванні в ТАНКТ ім. Г.М.Берієва глісування гідролітака [5]. Але ж очевидно, що сила тяги визначається опором моделі і не може бути призначена попередньо.

Отже відтворення повної системи сил при фізичному і математичному моделюванні гідродинаміки корпусу гідролітака потребує врахування вектора тяги двигуна. При математичному моделюванні точкою зведення сил має бути умовна

точка прикладення тяги двигуна, а сила тяги має визначатися у процесі розрахунку через розрахунковий опір і дійсний кут нахилу лінії тяги, наприклад, у ітераційній процедурі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Справочник по теории корабля. В 3-х томах. Под ред. Я.И.Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – Т. 1. – 764 с.
2. Плисов Н.Б., Рождественский К.В., Трешков В.К. Аэрогидро-динамика судов с динамическими принципами поддержания. – Л.: Судостроение, 1991. – 248 с.
3. ITTC – Recommended Procedures and Guidelines. Procedures for Resistance, Propulsion and Propeller Open Water Tests // Proceedings of 23rd International Towing Tank Conference. – Venice. – 2002. – P. 3.
4. Геронимус Я.Л. Теоретическая механика. – М.: Наука, 1973. – 512 с.
5. Аксёнов А.А., Шмелёв В.В., Сафронов П.В., Ледовских Ю.П. Применение программного комплекса FlowVision для моделирования режима глиссирования самолёта-амфибии. – Сборник докладов «Гидро-авиасалон-2006» 6-й научной конференции по гидроавиации. Геленджик, 2006. – С. 93–96.

Надійшла до редакції 31.10.2009