

Принцип роботи човна на підводних крилах

Н. А. Пушов

Група К-29, факультет комп'ютерних наук та кібернетики
nikitospupov@gmail.com

Загальна інформація

Судно на підводних крилах — тип швидкісного судна з динамічним принципом підтримки, у якого під корпусом розташовані підводні крила.[1]

Одним із особливостей суден такого типу – використання **підводних крил**. Цей елемент конструкції знаходиться у воді і підіймає човен над її поверхнею. Такі крила дуже схожі за призначенням та виглядом на крила літаків.

Широке використання таких суден обмежує складність їх будівництва та утримування. При великому навантаженні на крила, їх використання стає менш ефективним, порівнюючи зі звичайними човнами. Через це переважна кількість човнів на підводних крилах відносно невеликого розміру та використовуються як швидкі пасажирські поромі. Однак, простота дизайну створює великий простір для експериментів. Наразі досить популярні такі судна на підводних крилах, що приводяться в рух людською силою.

Перші прототипи

Перші згадки такого типу крил з'явилися в 1869 році в патенті француза *Еммануеля Дені Фаркота*, що зазначив: *“якщо прикріпити до боків і дна судна декілька похилих площин в формі клина, отримаємо ефект підняття з води і зменшення тяги”*

З 1899 по 1901 британський конструктор *Джон Торнікрофт* працював над декількома моделями з одним підводним крилом. В 1909 було створено повно розмірний човен, *"Miranda III"*. Наступна версія, *"Miranda IV"*, рухалася зі швидкістю 65 км/год. З розвитком цієї сфери кожен наступний човен був швидше за попередній. В 1950-х роках, конструктори створили *"White Hawk"*, що мав побити світовий рекорд швидкості. Але вони зіштовхнулися з феноменом кавітації[2], що починає значно обмежувати прискорення судна, коли його швидкість більша за 110 км/год.

Опис принципу роботи

1. При невеликій швидкості корпус човна пливе на воді, а крила повністю занурені в ній.
2. Як тільки швидкість човна збільшується, підводні крила починають створювати підймальну силу, що направлена догори.
3. При деякій швидкості ця підймальна сила стає рівною до ваги човна. Таким чином, корпус починає підійматися над водою.
4. Замість того, щоб збільшувати тягу зі збільшенням швидкості, корпус сильніше підіймається, тож забезпечується більш ефективний крейсерський рух. Зменшення тяги сприяє кращому використанню сили, необхідної для руху човна.

Теорія динаміки рідин

Для загального опису фізичної сторони принципу роботи підводних крил розглянемо дві *теорії динаміки рідин*[3]:

- Рівняння Бернуллі
- Рівняння Ейлера

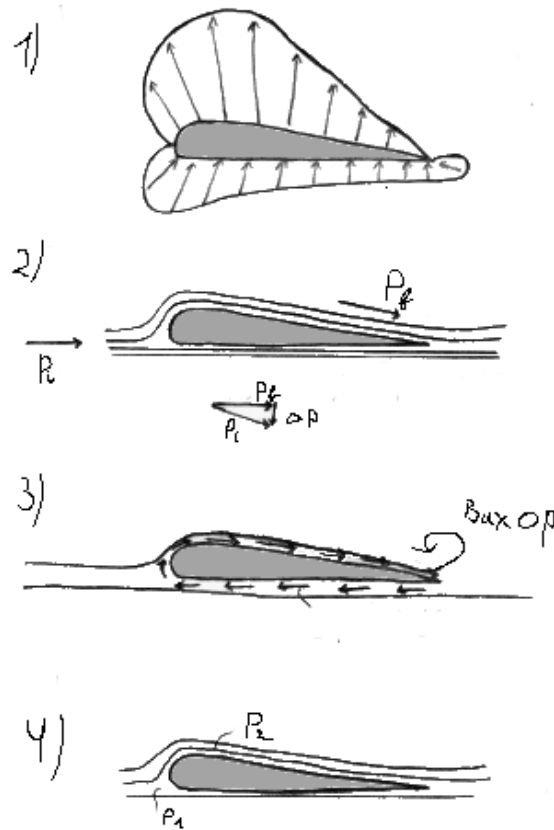


Рис. 1: Підводне крило: 1) Розподіл тиску 2) Збереження імпульсу 3) Циркуляція 4) Лінії потоку

Рівняння Бернуллі

$$P_0 = P_1 + \frac{\rho * v_1^2}{2} + \rho * g * y_1 = P_2 + \frac{\rho * v_2^2}{2} + \rho * g * y_2 \quad (1)$$

рівняння гідроаеромеханіки, яке визначає зв'язок між швидкістю v рідини, тиском p в ній та висотою y у частинок над площиною відліку, де ρ - щільність рідини, g - гравітаційна стала. Рівняння Бернуллі виражає закон збереження енергії рухомої рідини.

Висота крила досить невелика, тож різниця $\rho * g * y_1 - \rho * g * y_2$ досить незначна, тож нею можна знехтувати. Все що залишиться з формули (1) - це $P_1 + \frac{\rho * v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho * v_2^2}{2} = P_0$ - що є константою.

Отже, **тиск зменшується зі збільшенням швидкості руху уздовж ліній потоку**. Рідина над крилом рухається швидше, ніж рідина під крилом. Для збереження кутового імпульсу, викликаного обертанням вихорів проти годинникової стрілки, протилежний імпульс повинен бути таким самим. Це спричиняє рух рідини навколо крила. Векторна сума швидкостей призводить до більш високої швидкості на верхній поверхні та меншої на нижній. Застосовуючи це до закону Бернуллі, маємо що коли крило проходить крізь рідину, зміна швидкості призводить до тиску, що сприяє підйманню. В якийсь момент цей тиск стає більшим за тиск судна вниз і сила, що також збільшиться ($F = p * s$), починає діяти вгору.

Це пояснення може бути доповнено принципом збереження імпульсу ($p = m * v$, p - імпульс, m - маса, v - швидкість). Якщо швидкість об'єкта з початковим імпульсом збільшується, то виникає імпульс, що діє в протилежну сторону ($P_i = P_f + \Delta P$)

Рівняння Ейлера

$$\frac{d(p + \rho * g * y)}{dn} = \frac{\rho * v^2}{R} \quad (2)$$

де p - тиск, ρ - щільність рідини, v - швидкість, g - гравітаційна стала, y - висота, n - вектор у радіальному напрямку, R - радіус викривлення лінії потоку

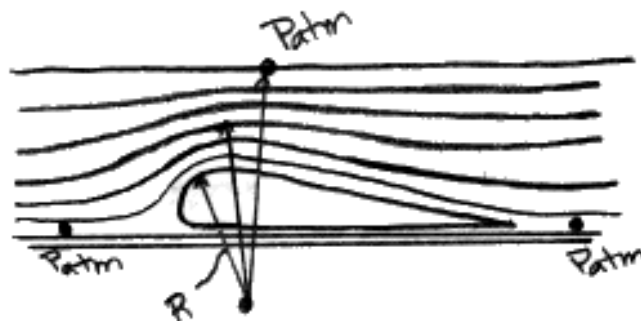


Рис. 2: Тиск в точках над крилом

Аналогічно, знехтуємо висотою крила. Це рівняння говорить про те, що чим далі ми від центру радіусу кривизни потоку, тим більше тиск на потоки.

Верхня поверхня крила ближча до центру кривизни потоку, тому тиск буде меншим, ніж тиск середовища над крилом. Різниця цих тисків створить додатковий тиск, що спричинить підйом крила.

Кут атаки

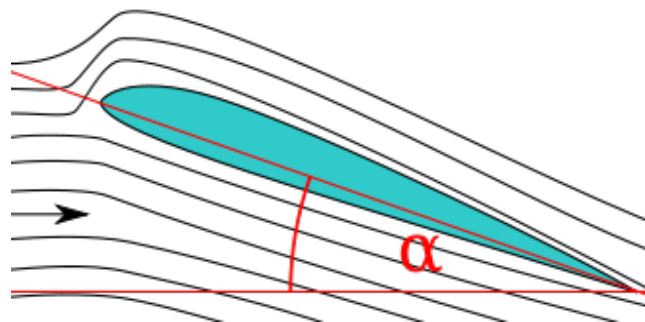


Рис. 3: Кут атаки

Як було сказано, підйом крила залежить від динаміки рідини, що його оточує.

Але підйом можна оптимізувати, розташувавши крило під кутом (відносно потоку рідини), що називається кутом атаки (рис 3)

Мета – оптимізувати співвідношення сили підйому до тяги двигуна. Воно залежить від форми крила, яке в даному випадку вважається досить тонким. При малому куті атаки підймальна сила швидко збільшується, а тяга досить повільно. Після кута в $\sim 10^\circ$ підймальна сила збільшується повільніше. На позначці в $\sim 15^\circ$ вона набуває свого максимуму. Коли кут атаки становить від 3° до 4° , співвідношення підйому до тяги стає максимальним (близько 25:1). Тож при такому куті атаки крило стає найбільш ефективним.

Лімітуючі фактори

Основна проблема, з якою стикнулися конструктори – конструкція крила, їх опор та їх розміщення. Усі ці особливості потрібно врахувати, щоб отримати мінімальну швидкість, при якій човен буде піднятий над водою.

Ще однією досить критичною проблемою, з якою можна зіткнутися – високі хвилі, що перевищують висоту опор.

Також, якщо судно швидше за хвилю, крило може винирнути з води, що призведе до втрати підйомної сили та створить негативний кут атаки. Коли судно зануриться в наступну хвилю, воно просто вріжеться у воду.

Недоліки

Судна на підводних крилах були на піку своєї популярності в 1960-х. З того моменту спостережується зменшення їх використання в якості судна для відпочинку, перевезення пасажирів, у військовій та комерційній сферах. Є багато причин, що призвели до цього:

1. Вони вразливі до ударів плаваючих предметів, морських тварин. При зіткненні з таким об'єктом, судно може впасти з опор, що досить небезпечно.
2. Крила мають гострі краї, які знаходяться у воді під час роботи. Вони можуть травмувати морських тварин.
3. Вони дорого коштують. Човен з підводними крилами може коштувати як три аналогічних пороми.
4. Такі човни досі вважаються чимось дивним та непротестованим. Таким чином, багато компаній не зважуються ризикувати, використовуючи їх. рух. Зменшення тяги сприяє кращому використанню сили, необхідної для руху човна.
5. Через технічно складну побудову, їх складно і дорого утримувати.

Література

- [1] Судно на підводних крилах. (2019, травень 6). Вікіпедія. Процитовано 19:27, травень 2, 2020 з https://uk.wikipedia.org/wiki/Судно_на_підводних_крилах
- [2] Кавітація. (2018, січень 25). Вікіпедія. Процитовано 19:27, травень 2, 2020 з <https://uk.wikipedia.org/wiki/Кавітація>
- [3] Fluid dynamics. (2020, травень 1). Вікіпедія. Процитовано 19:27, травень 2, 2020 з https://en.wikipedia.org/wiki/Fluid_dynamics
- [4] Hydrofoil. (2020, квітень 30). Вікіпедія. Процитовано 19:27, травень 2, 2020 з <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrofoil>
- [5] Hydrofoils. <https://web.mit.edu/2.972/www/reports/hydrofoil/hydrofoil.html>