

DOI: <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2020.14.1.182-193>

УДК 623.8

К.В. Марінічева<https://orcid.org/0000-0001-6462-3643>**О.М. Савінок**, к.т.н., доц.<https://orcid.org/0000-0002-4095-7267>**Т.А. Кобзар**<https://orcid.org/0000-0002-6008-8505>

Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум» Інституту Військово-Морських Сил Національного університету «Одеська морська академія», Україна

ПРИНЦИПИ ГІДРОБІОНІКИ ПРИ ПРОЕКТУВАННІ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У ВІЙСЬКОВО-МОРСЬКИХ СИЛАХ ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

Завдання сучасного науково-технологічного напрямку полягає у вивченні будови, морфологічних особливостей і функцій живих організмів, принципів дії їх рушіїв для використання отриманих відомостей при створенні нових механізмів. Розглянуто можливості гідродинамічної теорії плавання швидкісних риб, китоподібних і кальмарів, а також створеної теорії прикордонного шару і в'язкісного опору гідробіонтів та їх застосування при проектуванні технічних засобів. Відповідно, проблема аналізу досвіду практичного застосування принципів гідробіоніки при проектуванні технічних засобів з подальшим використанням у Військово-Морських Силах Збройних Сил України є актуальною і лежить в основі наших досліджень.

Наведені основні напрямки гідробіонічних досліджень з метою застосування їх у військовій техніці: створення технічних моделей на базі аналізу теоретичних основ плавання гідробіонтів; дослідження гідроакустичних здібностей гідробіонтів; принципів устрою, структури і функцій органів локомоції.

Ключові слова: біоніка, гідробіоніка, гідробіонти, адаптація, гідродинаміка, ламінаризація, модульність, махаючий рушій, водометні рушії, пружнодемпфуючі покриття, реактивний струмінь, турбулентна пульсація, пружнодемпфуючі властивості, біоакустична система китоподібних, турбуляція.

Постановка проблеми

Сучасні технічні засоби, в тому числі транспортні – повітряні, наземні і морські – досягли високого ступеня досконалості. У той же час живі організми – аеро- і гідробіонти залишаються об'єктом глибоких теоретичних досліджень для вчених, а також для конструкторів і винахідників.

Сучасний науково-технологічний напрямок передбачає не тільки вивчення будови, морфологічних особливостей, але і функцій живих організмів, принципів дії їх рушіїв для використання отриманих відомостей при створенні нових механізмів.

Сучасні технології дозволяють копіювати з високою точністю навіть мініатюрні природні конструкції. Однак копії не дозволяють досягти гідродинамічних та кінематичних характеристик, які характерні для біологічних об'єктів.

Стратегією Військово-Морських Сил Збройних Сил України (далі – ВМС ЗС України) 2035 передбачається поетапне нарощування спроможностей військово-морського флоту (далі – ВМФ), включаючи генерацію сил, їх освіту і підготовку до морських та об'єднаних операцій. Головним завданням ВМС ЗС України є забезпечення підводної охорони та поінформованості в зоні морської відповідальності України. З урахуванням сучасних розробок та напрямків, максимальна ефективність поставленої задачі може бути досягнута за рахунок використання будови, морфологічних особливостей і функцій живих організмів, принципів дії їх рушіїв при створенні нових механізмів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Аналіз практики створення гідромоделей, показав, що більш перспективними для використання в технічних пристроях виявилися принципи дії, закладені в рушіях швидкоплаваючих риб, дельфінів, пінгвінів і, навіть, жуків-плавунців [3].

Існує навіть такий напрямок, як «гідробіоніка в суднобудуванні», що є головним напрямком при вивченні принципів устрою, структури і функцій органів локомоції з метою вдосконалення пропульсивних якостей і маневреності технічних засобів руху в воді, а також створення нових технічних систем і засобів освоєння Світового океану. У ньому для подальшого моделювання аналізують плавання порівняно

великих і швидко плаваючих гідробіонтів – риб, дельфінів і кальмарів [4]. Природні адаптації гідробіонтів, такі як ламінаризована будова тіла, шкірні покриви, органи звукоехолокації – це унікальні природні здібності морських ссавців, які потребують застосування в інтересах ВМС Збройних Сил України.

Постановка завдання

Дослідниками вже накопичено великий досвід практичного застосування принципів гідробіоніки для створення різноманітних технічних засобів. Саме аналіз досвіду практичного застосування принципів гідробіоніки у проектуванні технічних засобів та можливість їх використання в інтересах ВМС Збройних Сил України і є метою наших досліджень. Методи дослідження – системно-структурний та дидактичний метод аналізу та синтезу інформації.

Аналіз останніх досягнень і публікацій

Досвід практичного застосування гідробіонічних досліджень форми тіла гідробіонтів має велику кількість прикладів. Систематичні дослідження особливостей плавання дельфінів були розпочаті в 1960 році, коли військовим відомством США було здійснено фінансування наукової програми, метою якої з'явилося дресування дельфінів для використання їх в якості помічників в освоєнні океану, а також визначення максимальної швидкості їх плавання. Перші спостереження за дресированими дельфінами підтвердили існуючу думку про те, що вони здатні рухатися з великими швидкостями протягом довгого часу. У зв'язку з цим було поставлено завдання вивчення механізму руху їх тіла і фізіологічних особливостей, які забезпечують високошвидкісні якості при порівняно малих витратах енергії.

Англійський дослідник Д. Грей влучно висловився про те, що природа сконструювала дельфіна набагато краще, ніж людина підводний човен або торпеду. На початку 70-х років ХХ століття оформилася самостійна наукова дисципліна – гідробіоніка, це один з напрямків в біоніці, яка вивчає гідробіонтів (китоподібних, риб і кальмарів). Коло питань, які відносяться до гідробіоніки включає в себе:

- біологічну гідродинаміку, яка займається розробкою теоретичних основ плавання гідробіонтів на базі аналізу результатів експериментального дослідження та сучасних досягнень в теоретичній гідромеханіці і на їх основі створення технічних моделей;
- дослідження гідроакустичних здібностей гідробіонтів, що проявляються в спілкуванні тварин між собою і в використанні звукоехолокації при орієнтації серед підводних предметів. У цьому випадку об'єктом вивчення є пристрій локаційного апарату гідробіонтів;
- вивчення навігаційних здібностей гідробіонтів, що виявляються при міграції на великі відстані;
- вивчення можливостей гідробіонтів щодо глибоководних занурень і фізіологічних особливостей, що забезпечують цю здатність [1].

У гідробіоніці використовуються теоретичний і експериментальний методи. Теоретичний метод базується на сучасних досягненнях математики і теоретичної гідромеханіки (нестационарний рух твердих тіл і тіл з деформованою поверхнею в ідеальній і в'язкій рідині, теорія прикордонного шару, теорія крила, чисельні методи та ін.). На їх базі в гідробіоніці розроблені основи гідродинамічної теорії плавання швидкісних риб, китоподібних і кальмарів, а також створена теорія прикордонного шару і в'язкісного опору гідробіонтів. Основний внесок в розвиток теоретичних методів гідробіоніки внесла група вчених інституту гідромеханіки АН України, очолювана професором Л.Ф. Козловим [2].

Виклад основного матеріалу дослідження

Аналіз гідробіонічних особливостей функціонально-морфологічних властивостей і кінематики руху китоподібних і швидкісних риб дозволяє розглядати в якості можливих такі способи ламінаризації прикордонного шару у гідробіонтів:

- наявність ламінаризованої форми тіла;
- гасіння турбулентної пульсації в прикордонному шарі за рахунок пружнодемпфіруючих властивостей шкірного покриву гідробіонтів;
- виділення в прикордонний шар гідробіонтів біологічного слизу;
- нестационарний характер руху гідробіонтів [5].

Ламінаризована форма ссавців була використана при розробці підводних човнів в США. Це атомні підводні човни «Albacore», «Sturgeon» і ін. (США), де знайшли застосування технічні профілі НАСА. Прикладом може слугувати зображення «Albacore» (рис. 1) в положенні на плаву, коли над поверхнею води піднімається тільки частина корпусу.

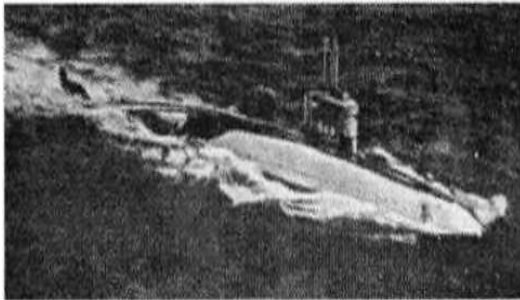


Рис. 1. Атомний підводний човен «Albacore» в надводному положенні [1]

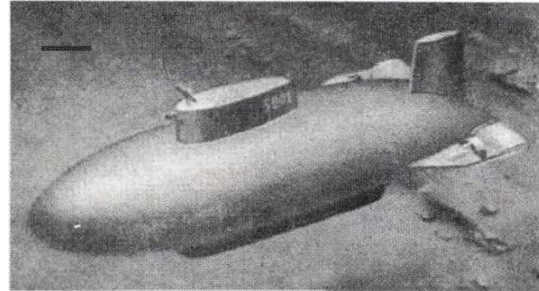


Рис. 2. Загальний вигляд ГА «Deep Quest»[4]

На основі гідробіонічних досліджень були створені глибоководні апарати (далі – ГА). Зіставлення координат профілю глибоководного апарату «Deep Quest», спроектованого і побудованого авіаційною фірмою «Lookheed», і профілю НАСА 63A-25 (створеного за результатами біонічних досліджень тіла дельфіна) показало майже повний збіг цих профілів [4].

Продовженням питання використання профілю дельфіна стало проектування і створення високошвидкісних глибоководних апаратів, підводної зброї (наприклад, торпед) фірмою «North American Aviation». Ними були проведені випробування великої серії моделей і в тому числі «Dolphin» (див. рис.3), яка виявилася найбільш вдалою. Конструкторами фірми було встановлено, що з ростом відносної швидкості, вдосконалення форми таких апаратів досягається використанням профілів НАСА зі зменшенням максимальної товщини в корму. Застосування профілю НАСА для високошвидкісних торпед (модель «Dolphin») дозволяє досягти більш 2-х кратного зменшення опору в порівнянні з традиційною торпедоподібною формою. При випробуванні моделі «Dolphin» за рахунок відносного збільшення довжини ламінарної ділянки (до 70% довжини) була досягнута мала шумність потоку, що є важливою характеристикою при створенні безшумної підводної зброї [4].

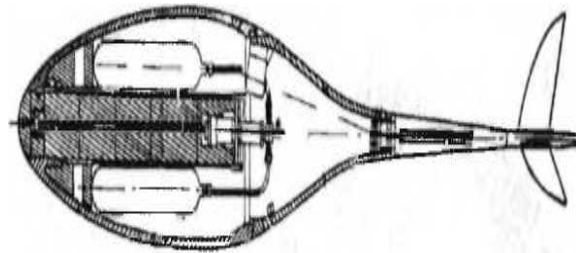
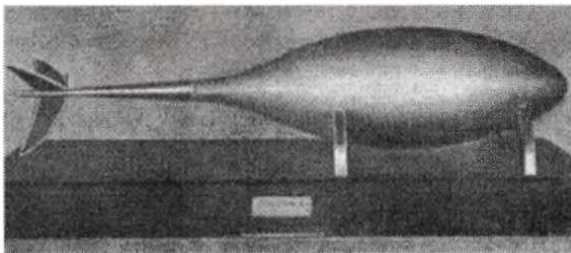


Рис. 3. Загальний вигляд моделі ГА «Dolphin» [4]

Оригінальне рішення використав Ж. Пікар при розробці глибоководного апарату «Benjamin Franklin» (рис. 4), призначення якого – дрейф і дуже повільне пересування в водах течії Гольфстрім. За біонічного аналога була взята синя плямиста риба (рис. 5), рух якої забезпечується за допомогою грудних плавців, що близько до тих властивостей, які знайшли втілення в глибоководному апараті «Benjamin Franklin» [1].

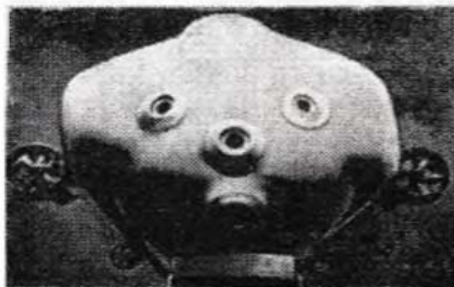


Рис. 4. Загальний вигляд ГА «Benjamin Franklin» [1]

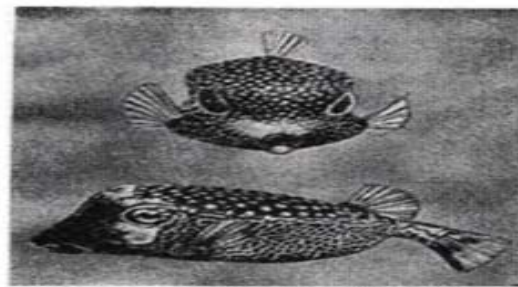


Рис. 5. Синя плямиста риба [1]

Форми «акула» і «дельфін» знайшли застосування в сучасному будівництві літаків зі зміщеною до кормової кромки найбільшою товщиною (25% від довжини профілю). Це рішення дозволяє поряд із зменшенням опору руху досягти збільшення корисних обсягів у порівнянні з літаками традиційної форми (рис. 6)

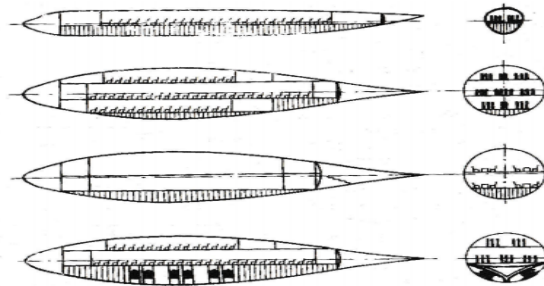


Рис. 6. Характеристики форм фюзеляжів сучасних літаків [1]

При створенні фюзеляжу планера А-15 (Антонов О.К.) використовували в якості аналога добре обтічну форму тіла меч-риби [1].

Окрім ссавців, об'єктами дослідження науковців стали головоногі молюски, кінетика їх руху. Наприклад, кальмари, досягли великих швидкостей плавання за допомогою пульсуючого водометного рушія, який представляє собою мантийно-вороночний комплекс органів з кільцевими м'язами. Пропульсивна сила створюється за рахунок періодичного забору води через відносно велику кільцеву щілину в порожнину м'язової мантиї і подальшого викидання струменя з великою швидкістю через вузьку центральну воронку. Крім цього, кальмар може рухатися також за допомогою плавників.

Форма тіла кальмара найчастіше веретеноподібна і розділена на мантию з плавником і голову з гідрореактивним соплом і щупальцями. Кормова частина мантиї, яка при русі кальмара під дією гідрореактивного струменя звернена в сторону руху, заокруглена, що покращує умови обтікання його тіла. Саме тому у кораблебудуванні застосовують круглу або заокруглену форму шпангоутів (поперечних ребер корпусу судна). Сопло пульсуючого водометного рушія розташоване за головою і його вхідний отвір при поступальному русі кальмара направлено в сторону, протилежну руху, а струмінь води викидається під кутом 5-10° до поздовжньої осі тіла. Рушійна сила в цьому випадку створюється тільки за рахунок пульсуючого водометного рушія. Парні плавці в цей момент щільно прилягають до мантиї.

Воронка функціонує як поворотне сопло гідрореактивного пульсуючого рушія. Розгортаючи її вільний кінець, кальмар пливе в будь-якому напрямку. Стрімкі кидки кальмарів супроводжуються сильними змінами форми тіла. Так, найбільший діаметр мантиї в момент заповнення становить п'яту частину довжини всього тіла, а при викиді зменшується в два рази [4].

Принцип руху головоногих молюсків з гідрореактивним (водометним) рушієм знайшов своє практичне застосування в суднобудуванні. Якщо хвильові і плавникові рушії, як засіб пересування у воді почали застосовувати тільки в останні 20-30 років, головним чином в дослідному порядку, то водометний рушіє є одним з перших гідравлічних рушіїв на судах, що пройшов тривалий шлях розвитку і вдосконалення.

За досить тривалий період (понад 300 років) свого розвитку і вдосконалення з'явилася велика кількість конструкцій водометів, які знайшли практичне застосування на судах світового флоту. Найбільш загальною конструктивною ознакою водометів є наявність направляючого каналу і робочого органу. Залежно від типу останнього і методу прискорення рідини, напрямні канали бувають круглого або прямокутного перерізу.

За способом створення реактивного струменя безперервної дії (для головоногих молюсків реактивний струмінь імпульсний) водометні рушії, які використовуються на судах, можна класифікувати на рушії з механічним приводом і з гідрореактивним. До характерних особливостей водометних рушіїв можна віднести добру захищеність робочого органу (розташованого в каналі всередині корпусу; вхідний отвір каналу обладнаний ґратами, які перешкоджають попаданню великих предметів в канал) і прекрасні

маневрені якості (можливість рухатися переднім та заднім ходом, розвертатися майже на місці завдяки відповідній установці заслінок). Але ці рушії мають велику масу (в яку входить система водопроточних каналів з водою всередині корпусу), займають великий обсяг, ускладнюючи розміщення корисного вантажу, мають порівняно невисокий коефіцієнт корисної дії (далі – ККД). ККД водометного рушія – поняття досить умовне, оскільки упор такого рушія створюється на корпусі і не завжди вдається точно розділити сили опору та упору. Грубо орієнтовно, ККД звичайного водометного рушія може становити приблизно 30%.

Довгий час водометні рушії мало застосовувалися на судах. Вважалося, що область їхнього застосування обмежується тихохідними судами, які плавають на мілководді, або у засміченому фарватері (наприклад, такі судна використовувалися на лісосплаві). Але приблизно з середини ХХ ст. їх популярність почала зростати. Цьому сприяли дві обставини: по-перше, замість розвиненої системи водопроточних каналів було запропоновано влаштувати один короткий канал в кормовій частині судна, забезпечуючи управління судном за допомогою заслінок, що відхиляють струмінь рушія в потрібну сторону. По-друге, було показано, що ККД водометного рушія на швидкохідних судах може досягати 60% і більш, тоді як у звичайних гребних гвинтів в цих умовах він може знижуватися через явище кавітації [6].

Водометні рушії знайшли практичне застосування при проектуванні, модернізації та будівництві військових суден. Прикладом може бути патрульний катер-перехоплювач проекту UMS-1000 нової модифікації, який був спущений на воду у Києві компанією UMS Marine. 13,5-метровий прикордонний «перехоплювач» з заводським позначенням РС 12 М-2 надійшов до Маріупольського загону морської охорони Державної прикордонної служби України, де отримав бортовий номер ВГ 25. Особливістю нового катеру став змінений пропульсивний комплекс. Встановлені два водомети Rolls-Royce FF310 з реверсивно-рульовими пристроями забезпечують рух катера вперед і назад, а також керування ним [6].

Водометні рушії використані при проектуванні десантних катерів проекту 11770, розроблених в «ЦКБ по СПК ім. Р.Є. Олексієва» (РФ). Особливістю десантного катера даного проекту є те, що його рух оснований на принципі повітряної каверни, яка створює під днищем катера штучні повітряні прошарки з надлишковим тиском. Вона ізолює більшу частину корпусу від контакту з водою, за рахунок чого досягається значне зниження гідродинамічного опору і забезпечуються високі швидкості ходу більше 30 вузлів. Катери проекту 11770 оснащені новим видом водометного рушія, лопаті робочого колеса якого пристосовані до роботи при постійному надходженні повітря в гідравлічний переріз рушія. Цей рушій назвали вентиляльним водометним рушієм (далі – ВВД). На відміну від традиційного водометного рушія, ВВД не має випрямляючого апарату та сопла, який формує струмінь. Конструктивно ВВД складається із водовода, на вихідному перерізі якого розміщується робоче колесо з приводом від гребного валу [6].

Знайшли своє застосування водометні рушії і при проектуванні підводних човнів та апаратів. Сучасні підводні човни оснащуються єдиним водометом, акустичне випромінювання якого екрановано з носових курсових кутів корпусом ПЧ, з бічних курсових кутів – кожухом водомета. Область чутності обмежена вузькими кормовими курсовими кутами. Зниження рівня власних шумів ПА в першу чергу залежить від потужності, кількості і типу рушіїв. Потужність пропорційна водотоннажності і швидкості ходу ПЧ [7].

У китоподібних і швидкісних риб існує ціла система природних застосувань, що дозволяють ефективно переміщення у водному середовищі та привертають увагу дослідників. Численними дослідженнями біологів встановлено, що форма тіла, її зовнішня і внутрішня структури знаходяться в залежності від швидкості руху морських тварин. Існує два режими плавання: рибоподібний та дельфіноподібний. У риб зі збільшенням швидкості їх плавання збільшується частота махових рухів плавця. Здійснення махових рухів плавців надає можливість створення режиму «чистої» тяги. На відміну від хвильового рушія риб, у китоподібних тварин – рушій машучий, плавцевий [3]. Тому, при створенні підводних апаратів, зусилля дослідників направлені не тільки на відтворення форми морських тварин, але і на застосування біонічних принципів руху. Прикладом використання біонічних досліджень можуть бути

розробки індійських вчених (Ajith Anil Meera, Attadappa Puthanveetil Sudheer) [8]. Науковці знайшли можливість вирішення проблематики енергозбереження і автономного використання біороботів за рахунок біоміметичного магістрального плавця риби-робота, який спроектували за прототипом середнього парного плавця риби-ніж (*Xenomystus nigri*).

У природі частіше спостерігаються два різновиди плавання: вугревидний і скомброїдний [3]. При плаванні більшості водних тварин найбільш поширений хвилеподібний (ундуляційний) спосіб плавання, що полягає в тому, що тіло тварини або окремі його ділянки здійснюють коливальні рухи [2].

Різні способи руху гідробіонтів науковці використовували при розробці підводних апаратів. Найбільш перспективним, є розробка підводних апаратів здатних переходити з рибоподібного режиму плавання на дельфіноподібний та навпаки.

Китайські вчені (Gang Xue Key, Yanjun, Zhi Chen, Shizhen Li) зосереджуються на розвитку біонічно-автономного підводного транспортного засобу. У якості фізичного прототипу обраний хвилеподібний рух риб. Планується розробка цілої серії підводних транспортних засобів та обладнання для роботи в океані. Транспортні засоби зможуть збирати гідрологічні параметри, виявляти топографію підводного човна зі зростаючою глибиною досліджень та складністю розвідки [9].

Інша група дослідників з Китаю (Jiayong Chen, Youdong Chen, Binghuan Yu, Ruxu Du and Yong Zhong* Fengran Xie) розробляють стратегією контролю уникнення перешкод, використовуючи біоміметичку риб для створення риби-робота, керованого дротом. Робот може виявляти перешкоди, здатний робити плавні переходи між різними режимами плавання та реагувати на навколишнє середовище [10].

Група російських вчених (С. Яцун, Б. Лушніков, Є. Політов та С. Князев) лабораторії мехатроніки та робототехніки Південно-Західного державного університету м. Курськ Росія створила модель підводного плаваючого робота-риби. При створенні свого робота, науковці провели порівняльний аналіз результатів математичного моделювання і повномасштабні тестування підводних роботів-риб, реалізованих за допомогою пакету MATLAB/Simulink [11].

Самою цікавою і перспективною розробкою можна вважати створений китайськими та американськими вченими (Zheng Chen, Tae I. Um & Hilary Bart-Smith) роботизований скат-манта, максимально схожий на свого прототипа – ската-манти (*Manta birostris*). Робот оснащений штучними м'язами з іонного полімерно-металевого композиту. Для створення коливальних рухів апарат використовує два штучних грудних плавця, які створюють тягу. Автори і в подальшому планують продовжувати роботу над конструкцією роботу в наступних двох аспектах: будуть розроблені кінематична і динамічна моделі ската-манти [12].



Рис. 7. Bio-inspiration: The Manta Ray [12].



Рис. 8. Robotic manta ray body [12].

Актуальною темою останніх досліджень є створення пневматичної мускулатури (ПМ) гнучких приводів, що використовуються в біонічних роботах. Таку інноваційну роботу представили вчені Китаю (Bin-Rui Wang, Ying-Lian Jin, Dong Wei) [13].

Питання локомоції китоподібних досить глибоко вивчалось такими відомими авторами як, Томілін А.Г., Яблоков А.В., Агарков Г.Б., Алєєв Ю.Г., Агарков Г.Б., Порушено С.В., та ін. [14]. Тривалі дослідження дозволили науковцям встановити, що ефективно переміщення у водному середовищі, особливо швидкісне, неможливе без гідродинамічної оптимізації покривів, які дозволяють впливати на прикордонний шар, робити його ламінарним, зменшувати тертя. Як і у всіх хребетних, зовнішньою складовою покривів риб і рибоподібних є відносно тонкий епідерміс з 2-15 шарів клітин. Розподіл циліндричних клітин нижнього, росткового або базального шару забезпечує регенерацію і заповнення клітин верхніх шарів, що постійно втрачаються. Під паростковим шаром клітин розташована базальна мембрана, яка відокремлює епідерміс від нижчого шару – коріуму або дерми. Клітини епідермісу в міру зростання переміщуються до поверхні, стають більш щільними і накопичують кератин. Мабуть, для всіх хребетних генеральною здатністю клітин епідермісу є здатність накопичення цього білка, що утворює його тверді або рогові шари. Такі тверді структури звичайні у первинноназемних хребетних і відносно рідкісні у риб і рибоподібних. В епідермісі риб і рибоподібних розташовані одноклітинні залози. Основним продуктом виділення одноклітинних залоз є рідкий за своїм складом слиз [15]. Саме слиз сприяє зменшенню в'язкості прикордонного шару і опору при русі. Оскільки в'язкість слизу нижче в'язкості води, виділення слизових залоз сприяють ламінаризації прикордонного шару. Експериментально показано, що водний розчин слизу призводить до зниження опору до 66% [16]. Біокомплекси слизу на покриттях, у швидкісних риб формують довгі ланцюжки, знижують тертя при турбулентному плинні потоків [15, 16].

При зростанні швидкісних характеристик переміщення різних видів риб, склад і розташування слизових клітин змінюється. Зменшується кількість типів клітин. У найбільш швидкісних кісткових риб і акул залишаються тільки округлі залозисті клітини, що свідчить про гідродинамічну спеціалізацію секрету, як складного біополімеру, в якому стає відносно більше білків. Розподіл залоз пов'язаний з параметрами прикордонного шару. Скупчення цих клітин виявляються там, де ймовірність збурення і навіть відрив прикордонного шару найбільш вірогідні – за зябровими щілинами, в частинах тіла, що звужуються, біля хвоста. При збільшенні швидкісних характеристик плавання максимальна кількість таких клітин зміщується до хвоста. У деяких тунців майже всі клітини епідермісу в хвостовій частині стають слизовими. Феноменальний ефект різкого зниження опору у риб за рахунок виділення слизу в прикордонний шар знайшов своє використання при створенні різних технічних засобів і, зокрема, в суднобудуванні [17].

На локомоцію гідробіонтів впливає не тільки виділення слизу шкірою. Існує ще одне природне пристосування – зміна демпферних властивостей різних ділянок шкіри гідробіонтів.

Шкіра дельфінів – досить складно розчленована та має кілька сполучнотканинних мембран. Поверх підшкірної жирової клітковини розташовані шкірні м'язи. Їх волокна розташовані косо і дозволяють змінювати натяг шкіри при згинаннях тіла, що перешкоджає утворенню складок. Встановлено, що швидкісні представники китоподібних, на відміну від риб, здійснюють активне управління прикордонним шаром, а це в умовах нестационарного режиму обтікання, більш ефективно [18]. Основа такої регуляції – зміна демпферних властивостей різних ділянок, що дозволяє гасити турбуляцію і різко знижувати опір. Подібний стан покривів – одна з провідних адаптацій до швидкісного переміщення представників групи. Складна рецепторна система дермальних сосочків дозволяє реєструвати локальне виникнення турбуляційних пульсацій і рефлекторно змінювати тиск в судинах сосочків шляхом перерозподілу крові магістральних судин, підсосочкового шару дерми і самих сосочків [19].

В даний час в науковій літературі висловлюються певні думки щодо перспективи використання штучних пружнодемпфіруючих покриттів для нанесення на корпус судна. Вважається, що практичній реалізації ідеї, запропонованої М. Крамером, перешкоджає не достатня міцність та довговічність можливих покриттів, здатність до старіння і нестабільність механічних характеристик в часі, що особливо важливо для швидкохідних суден [19].

Розробкою гнучких покриттів та використанням хвостового плавця на біонічних принципах на теперішній час зацікавились китайські вчені (Gang Xue, Yanjun Liu, Muqun Wei, Jian Zhang, Huaqing Luo). Ряд робіт підтвердив, що пропульсивний ККД коливального гвинта з гідробіонічним покриттям значно вище, ніж у звичайного гвинта і гнучкі коливання мають більш високу пропульсивну ефективність, ніж жорсткі коливання без явного збільшення опору рідини [20].

Перше в 1948 році наукове повідомлення на Міжнародному конгресі про вплив високомолекулярних добавок на опір руху рідини було зроблено англійським дослідником Б. Томсом. Автор повідомлення отримав двократне зменшення опору в турбулентному потоці. Надалі ефект різкого зниження опору за рахунок полімерних добавок отримав найменування ефекту Томса. Однак пройшло ще багато років, перш ніж в 1961 році були розпочаті систематичні дослідження (США, Англія, Канада та ін.) можливості зниження опору шляхом додавання в рідину полімерів, серед яких найбільш ефективними виявилися гуар і оксиди поліетилену, що володіють рядом специфічних властивостей: добре розчинні у воді, мають високу молекулярну вагу і ін. Додавання в рідину полімерів для зниження опору виявилось економічно неефективним методом через досить високу вартість кінцевого продукту [1].

В ході еволюції у китоподібних сформувалася досконала система звукових сигналів – з її допомогою вони орієнтуються в просторі, добувають їжу, передають інформацію один одному. Дельфіни використовують гідролокацію з метою пошуку їжі і виявлення перешкод. Зір і нюх ссавців чудово адаптований до підводного і надводного бачення. Ефективність виявлення, орієнтації в тривимірному просторі і зв'язок між особинами залежать від пластичності біоакустичної системи китоподібних адаптуватися до складної перешкодової обстановки біогенного і антропогенного походження [21]. Для дельфінів, у яких харчові переваги перебувають у поверхні або придонного шару, боротьба з акустичною реверберацією також є основним завданням при пошуку і розпізнаванні. Відомо, що для зниження ревербераційного фону необхідно використовувати короткі акустичні імпульси. Ехолокаційні імпульси дельфіна відрізняються від акустичних імпульсів, що використовуються в технічних системах пошуку і розпізнавання підводних об'єктів [22].

Міністерство оборони США фінансує з 2002 р проекти систем пошуку і класифікації замулених донних мін на основі біосонара. Заплановані розробки автономних міні систем типу «робот-дельфін» і пристроїв на базі нових технологій з антенами, які використовують «дельфіноподібні» сигнали [23].

Акустичний зв'язок дельфінів вирішує проблеми боротьби з багатопроменевою інтерференцією звукових хвиль, стійкості до реверберації зсувів, адаптивного налаштування сигналів на можливості каналу зв'язку. В «Державному океанаріумі» розроблена система цифрового звукопідводного зв'язку на біонічних принципах, що відрізняється зміною несучого сигналу постійної частоти на послідовність частотно модульованих сигналів з високими частотними градієнтами, а також наявністю опорного ЧМ-сигналу для розрахунку реверберації руйнувань в каналі в режимі реального часу.

Експериментальні дослідження і проведені випробування системи, що реалізує інноваційний біонічний принцип підводного зв'язку, в природних умовах на зовнішньому рейді (глибина до 50 м) засвідчили впевнений багатокористувацький зв'язок в умовах швидкого руху і сильної реверберації [24, 25].

Висновки

Таким чином, були представлені:

- практичне застосування гідробіонічних досліджень форми тіла гідробіонтів у проектуванні підводних човнів, апаратів та сучасних літаків;
- на підставі вивчення кінетики руху головоногих молюсків – створення водометного рушія;
- гідродинамічна оптимізація покривів гідробіонтів, що дозволяє впливати на прикордонний шар – створення біополімерів;
- біонічні принципи руху – розробка цілої серії підводних транспортних засобів та обладнання, що працює в океані;

- зміна демпферних властивостей різних ділянок шкіри гідробіонтів – створення і використання штучних пружнодемпфіруючих покриттів;
- звукоехолокаційна система, акустичний біосенсор китоподібних – створення широкосмугової антени для формування акустичного імпульсу, системи пошуку і класифікації замулених донних мін на основі біосонара, розробки автономних міні систем типу «робот-дельфін» і пристроїв на базі нових технологій з антенами, які використовують «дельфіноподібні» сигнали; система цифрового звукопідводного зв'язку на біонічних принципах.

Перспективні напрямки досліджень

Детальний аналіз практичного застосування принципів гідробіоніки у проектуванні технічних засобів надає можливість визначити наступні пріоритетні напрямки розвитку:

- створення і вдосконалення водометних рушіїв з більшим ККД і меншою вартістю;
- використання нових типів матеріалів, які в перспективі забезпечать кораблям, ПЧ, (НПА, ННА) більшу швидкість, малу помітність для радарів, будуть легкі та дешеві;
- створення і вдосконалення технологій і засобів зв'язку на біонічних основах, пошуку підводно-пошукового, підводно-охоронного, аварійно-рятувального призначення.

Вивчення наукової літератури показує перспективність досліджень в цьому напрямку і перспективність подальшого застосування результатів досліджень у проектуванні технічних засобів з метою всебічного забезпечення Військово-Морських Сил Збройних Сил України.

Список використаних джерел

1. Гидробионика в судостроении: учебное пособие/ Н.Б. Слижевский. Николаев : УГМТУ, 2002. 112 с.
2. Козлов Л.Ф. Теоретична гідродинаміка. Київ: Вища школа, 1983. 240 с.
3. Першин С.В. Основы гидробионики. Л.: Судостроение.1988. 263 с.
4. Гидробионика в судостроении. - М. Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований, 1970.
5. Теория плавания рыб и дельфинов :Е.В. Романенко Москва : Наука. 1986. 148 с.
6. Куликов С., Храпкін М. – Водометные движители 1965 Антоненко С. Судові рушії. 2007.
7. Голод О.С., Гончар А.И., Шлычек Л.И. Перспективы и концепции разработки автономных необитаемых подводных аппаратов. Гидроакустический журнал. 2007 № 4.
8. Design Optimization of the Biomimetic Undulating Fin of a Knife Fish Robot. Ajith Anil Meera, Attadappa Puthanveetil Sudheer Submitted. Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems VOLUME 10, N° 1. 2016.
9. Motion Model of Fish-like Underwater Vehicle and its Effect on Hydrodynamic Performance. 1st Gang Xue Key , 2nd Yanjun, 3rd Zhi Chen , 4th Shizhen Li. All content following this page was uploaded by Gang Xue. 2018.
10. Obstacle Avoidance Control Strategy of a Biomimetic Wire-driven Robot Fish* Jiayong Chen, Youdong Chen, Binghuan Yu, Ruxu Du and Yong Zhong* Fengran Xie. Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics Dali, China, December 2019.
11. Underwater floating robot-fish: a comparative analysis of the results of mathematical modelling and full-scale tests of the prototype Sergey Jatsun*, Boris Lushnikov, Evgeny Politov and Sergey Knyazev. MATEC Web of Conferences 113 12th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings» - 2017.
12. Bio-inspired robotic manta ray powered by ionic polymer–metal composite artificial muscles. Zheng Chen , Tae I. Um & Hilary Bart-Smith. International Journal of Smart and Nano Materials Vol. 3, No. 4, December 2012, 296–308.

13. Modeling of Pneumatic Muscle with Shape Memory Alloy and Braided Sleeve Bin-Rui Wang¹, 2 Ying-Lian Jin¹ Dong Wei¹ ¹School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, PRC ²State Key Laboratory of Robotics, Shenyang 110016, PRC. International Journal of Automation and Computing 7(3), August 2010, 283-288 DOI: 10.1007/s11633-010-0504-x.
14. Аппараты с машущими движителями и их природные аналоги: монография/ Т. Х. Ахмедов, А. К. Бродский, И. Ф. Галанин, Р.М. Зелеев. Москва : Инфра-Инженерия, 2018. 360.
15. Ускова Е.Т., Чайковська О.В., Костіна Т.А., Усков І.А. Про структуру біокомплексів слизових речовин шкіри швидкоплаваючих риб // Біоніка, 1982. Вип. 16. З 16-21.
16. Кобець Г.Ф., Зав'ялова В.С., Комаров М.І. Вплив слизу на турбулентне тертя // Біоніка. 1969. Вип. 3. С. 80-84.
17. Hoyt T.W. Hydrodynamic drag reduction due to fish slimes // Swimming and Flying in Nature. 1975. V. 1. P. 653-672.
18. Томілін А.Г. Знову в воду. М.: Знание, 1977. 152 с.
19. Kramer M.O. The dolphins' secret // New Sci. 1960. Vol. 7. № 181. P. 1118-1120.
20. Optimal design and numerical simulation on fish-like flexible hydrofoil propeller. Gang Xue¹), Ph. D, Yanjun Liu¹), Prof., PH. D, Muqun Zhang¹), Master Wei Zhang¹), Ph. D, Jian Zhang¹), Ph. D, Huaqing Luo¹), Master Rui Jia¹), Master 1) Polish maritime research 4 (92) 2016 vol. 23; pp. 59-66 10.1515/pomr-2016-0070.
21. Дубровский Н.А. Эхолокация у дельфинов // М.: ЦНИИ «Румб», 1976.
22. Сміт К. Біологія сенсорних систем. М.: Изд-во «БІНОМ Лабораторія знань», 2005. 583 с.
23. Au, W. W. L. Echolocation signals of the Atlantic bottlenosed dolphin (*Tursiops truncatus*) in open waters, in *Animal Sonar Systems*, edited by R. G. Busnel and J. F. Fish (Plenum, New York), 1980. p. 251-282.
24. Кулагин В.В., Б.А. Журид Теория морских биотехнических систем, Севастополь, 2010. 330 с.
25. Кулагін В.В. Науково-дослідний центр Збройних Сил України «Державний океанаріум», Севастополь, 2011. 273 с.

References

1. Slizhevskiy, N.B. (2002). *Gidrobionika v sudostroyenii: uchebnoye posobiye. [Hydrobionics in shipbuilding]*. Nikolayev: UGMTU [in Russian].
2. Kozlov, L.F. (1983). *Teoretychna hidrodynamika. [Theoretical hydrodynamics]*. Kyiv: Vyscha shkola [in Ukrainian].
3. Pershin, S.V. (1988). *Osnovy gidrobioniki. [Hydrobionics Basics]*. L.: Sudostroyeniye [in Russian].
4. *Gidrobionika v sudostroyenii. [Hydrobionics in shipbuilding]*. (1970). М. Tsentral'nyy nauchno-issledovatel'skiy institut informatsii i tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniy [in Russian].
5. Romanenko, Ye.V. (1986) *Teoriya plavaniya ryb i del'finov. [Swimming theory of fish and dolphins]*. Moskva: Nauka [in Russian].
6. Kulikov, S., & Khramkin, M. (1965). *Vodometnyye dvizhiteli. [Water jet propulsion]*. Antonenko, S. (2007). *Sudovi rushiyi. [Ship engines]* [in Russian].
7. Golod, O.S., Gonchar, A.I., & Shlychek, L.I. (2007). Perspektivy i kontseptsii razrabotki avtonomnykh neobitayemykh podvodnykh apparatov.[Prospects and concepts for the development of autonomous unmanned underwater vehicles]. *Gidroakusticheskiy zhurnal*, 4 [in Russian].
8. Design Optimization of the Biomimetic Undulating Fin of a Knife Fish Robot. Ajith Anil Meera, Attadappa Puthanveetil Sudheer Submitted. Journal of Automation, Mobile Robotics & Intelligent Systems, (2016). *Volume 10, 1* [in English].
9. (2018). Motion Model of Fish-like Underwater Vehicle and its Effect on Hydrodynamic Performance. 1st Gang Xue Key , 2nd Yanjun, 3rd Zhi Chen , 4th Shizhen Li. All content following this page was uploaded by Gang Xue. [in English].

10. Jiayong Chen, Youdong Chen, Binghuan Yu, Ruxu Du & Yong Zhong, Fengran Xie. (December 2019). Obstacle Avoidance Control Strategy of a Biomimetic Wire-driven Robot Fish. Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics Dali, China. [in English].
11. Sergey Jatsun, Boris Lushnikov, Evgeny Politov and Sergey Knyazev. (2017). Underwater floating robot-fish: a comparative analysis of the results of mathematical modelling and full-scale tests of the prototype. MATEC Web of Conferences 113 *12th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics «Zavalishin's Readings»*. [in English].
12. Zheng Chen, Tae I. Um & Hilary Bart-Smith. Bio-inspired robotic manta ray powered by ionic polymer-metal composite artificial muscles.. *International Journal of Smart and Nano Materials Vol. 3, 4*, December 2012. [in English].
13. Modeling of Pneumatic Muscle with Shape Memory Alloy and Braided Sleeve. Bin-Rui Wang, Ying-Lian Jin, Dong Wei. School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, PRC 2State Key Laboratory of Robotics, Shenyang 110016, PRC. *International Journal of Automation and Computing* 7(3), August 2010, 283-288 DOI: 10.1007/s11633-010-0504-x. [in English].
14. Akhmedov, T.X., Brodskiy, A.K., Galanin, I.F., & Zeleyev R.M. (2018). *Apparaty s mashushchimi dvizhitelyami i ikh prirodnyye analogi. [Devices with flapping propellers and their natural analogues]*. Moskva: Infra-Inzheneriya [in Russian].
15. Uskova, E.T., Chaikovska, O.V., Kostina, T.A., & Uskov, I.A. (1982). *Pro strukturu biokompleksiv slyzovykh rehovyn shkiry shvydkoplavaiuchykh ryb. [On the structure of biocomplexes of mucous substances of the skin of fast-swimming fish]*. Bionika. Vyp. 16 [in Ukrainian].
16. Kobets, H.F., Zavalova, V.S., & Komarov, M.L. (1969). *Vplyv slyzu na turbulentne tertia. [Influence of mucus on turbulent friction]*. Bionika. Vyp. 3 [in Ukrainian].
17. Hoyt, T.W. (1975). Hydrodynamic drag reduction due to fish slimes // *Swimming and Flying in Nature*. V. 1. [in English].
18. Tomilin, A.H. (1977). *Znovu v vodu. [Back in the water]*. M.: Znaniye [in Ukrainian].
19. Kramer, M.O. (1960). The dolphins' secret. *New Sci. Vol. 7, 181*. [in English].
20. Optimal design and numerical simulation on fish-like flexible hydrofoil propeller. Gang Xue, Ph. D, Yanjun Liu, Prof., PH. D, Muqun Zhang, Master Wei Zhang, Ph. D, Jian Zhang, Ph. D, Huaqing Luo, Master Rui Jia, Master. *Polish maritime research* 4 (92) 2016 vol. 23; 59-66 10.1515/pomr-2016-0070. [in English].
21. Dubrovskiy, N.A. (1976). *Ekhlokatsiya u del'finov. [Echolocation in dolphins]*. M.: TSNII «Rumb» [in Russian].
22. Smit, K. (2005) *Biolojiya sensorykh system. [Biology of sensory systems]*. M.: Yzd-vo «BINOM Laboratoriya znan'» [in Ukrainian].
23. Au, W. W. L. Echolocation signals of the Atlantic bottlenosed dolphin (*Tursiops truncatus*) in open waters, in *Animal Sonar Systems*, edited by R. G. Busnel and J. F. Fish (Plenum, New York), 1980.24. [in English].
24. Kulagin, V.V., & Zhurid., B.A. (2010). *Teoriya morskikh biotekhnicheskikh system. [Theory of marine biotechnical systems]*. Sevastopol', [in Russian].
25. Kulahin, V.V. (2011). *Naukovo-doslidnyi tsentr Zbroinykh Syl Ukrainy «Derzhavnyi okeanarium»*, Sevastopol [in Ukrainian].

Рецензент: Скрипка М.В., доктор ветеринарних наук, професор, Одеський державний аграрний університет, Україна

ПРИНЦИПЫ ГИДРОБИОНИКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ

Е. Мариничева, О. Савенок, Т. Кобзарь

Задача современного научно-технологического прогресса состоит в изучении строения, морфологических особенностей и функций живых организмов, принципов действия их двигателей для использования полученных сведений при создании новых механизмов. Рассмотрены возможности гидродинамической теории плавания скоростных рыб, китообразных и кальмаров, а также созданная теория пограничного слоя и вязкостных сопротивлений гидробионтов и их применение при проектировании технических средств.

Целью исследований является: анализ опыта практического применения принципов гидробионики в проектировании технических средств с последующим использованием в Военно-Морских Силах Вооруженных Сил Украины является актуальной и лежит в основе наших исследований. Метод исследования является системно структурный, а также дидактические методы анализа и синтеза информации.

Приведены основные направления гидробионических исследований с целью применения их в технике: создание технических моделей на базе анализа теоретических основ плавания гидробионтов и применения результатов экспериментального исследования в теоретической гидромеханике; исследования гидроакустических способностей гидробионтов, проявляющиеся в общении животных между собой и в использовании звуколокации при ориентации среди подводных предметов; принципов устройства, структуры и функций органов локомоции с целью совершенствования пропульсивных качеств и маневренности технических средств движения в воде. Природные адаптации гидробионтов, такие как ламинаризованная форма тела, кожные покровы, органы звукоэхолокации – это уникальные природные способности морских млекопитающих, которые требуют применения в интересах ВМС Вооруженных Сил Украины.

Ключевые слова: бионика, гидробионика, гидробионты, адаптация, гидродинамика, ламинаризация, модульность, машущий двигатель, водометные движители, упругодемпфирующие покрытия, реактивная струя, турбулентная пульсация, упругодемпфирующие свойства, биоакустическая система китообразных, турбуляция.

PRINCIPLES OF HYDROBIONICS IN DESIGNING TECHNICAL MEANS

E. Marinicheva, O. Savenok, T. Kobzar

The task of modern scientific and technological progress is to study the structure, morphological features and functions of living organisms, the principles of operation of their engines for using the information obtained when creating new mechanisms. Possibilities of the hydrodynamic theory of swimming of high-speed fish, cetaceans and squids, as well as the created theory of the boundary layer and viscous resistance of aquatic organisms and their application in the design of technical means are considered.

The purpose of the research: the analysis of the experience of practical application of the principles of hydrobionics in the design of technical means with subsequent use in the Naval Forces of the Armed Forces of Ukraine is relevant and forms the basis of our research. The research method is systemic and structural, as well as didactic methods of analysis and generalization of information.

The main directions of hydrobionic research with the aim of their application in technology are given: creation of technical models based on the analysis of the theoretical foundations of swimming of hydrobionts and the application of the results of experimental research in theoretical hydromechanics; studies of hydroacoustic abilities of aquatic organisms, manifested in the communication of animals with each other and in the use of sonar when orienting among underwater objects; the principles of the device, structure and functions of the organs of locomotion in order to improve the propulsive qualities and maneuverability of technical means of movement in water. Natural adaptations of aquatic organisms, such as a laminarized body shape, skin integuments, sound-and-echolocation organs, are unique natural abilities of marine mammals that require application in the interests of the Ukrainian Navy.

Keywords: bionics, hydrobionics, hydrobionts, adaptation, hydrodynamics, laminarization, modularity, flapping engine, jet propellers, elastic damping coatings, jet stream, turbulent pulsation, elastic damping properties, bioacoustic system of cetaceans, turbulation.