

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ

**Миколаївський ордена Трудового Червоного Прапора
кораблебудівний інститут імені адмірала С. О. Макарова**

На правах рукопису

МОРОЗ Володимир Васильович

УДК 629.127

**ГІДРОДИНАМІЧНІ АСПЕКТИ ПРОЕКТУВАННЯ
КЕРОВАНОВО БУКСИРУЄМОГО ПІДВОДНОГО
АПАРАТА З ПОВОРОТНИМ КРИЛОМ**

05.08.03 — проектування і конструкція суден

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Миколаїв — 1993

ЛННБ України ім. В. Стефаніка



00777799 (3)

Працю виконано в Інституті гідромеханіки АН України

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор
Александров М.М.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук, професор
Дихта Л.М.

- кандидат технічних наук
Богородицький О.О.

Провідна установа - Центральне конструкторське бюро "Ілхуна"

Захист відбудеться "23" 05 1994 р. о "___" годині на
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 053. 04. 01 при Миколаївському ордена Трудового Червоного Прапора кораблебудівному інституті імені адмірала С.І.Макарова за адресою: 327 025, м.Миколаїв - 25, пр. Героїв Сталінграда, 9, МКІ.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Миколаївського кораблебудівного інституту.

Автореферат розіслано "18" 04 1994 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.т.н., професор

Квасницький В.Ф.

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

В загальному комплексі технічних засобів дослідження і освоєння Світового океану важливе місце займають підводні буксирюємі системи (ПБС), за допомогою яких вдається виконувати тривалі вимірювання параметрів водного середовища на різних горизонтах, картографувати дно та вести пошук об'єктів що затонули. До складу ПБС входять судно-буксир, буксирно-кабельні пристрої і власне буксирюємі підводний апарат з гідродинамічними пристроями занурення та відведення. Останнім часом в складі ПБС використовуються буксирюємі підводні апарати здатні збільшувати або зменшувати свою занурюючу силу і таким чином здійснювати маневрування по просторовій траєкторії за судном-буксиром в широкому діапазоні глибин та відведень. Крім цього, застосування на сучасних керованих буксирюємих підводних апаратах (КБПА) приладів спрямованої дії і систем автоматичного керування рухом вимагає від них руху по просторовій траєкторії з обумовленою орієнтацією корпусу в просторі, наприклад, рух КБПА по просторовій траєкторії з нульовим кутом диферента корпусу, маневрування по глибині з нульовим кутом атаки корпусу і т.п. Такі режими руху можуть бути реалізовані при використанні в конструкції КБПА поворотного крила. Враховуючи те, що при проектуванні керованих буксирюємих підводних апаратів з поворотним крилом питання, пов'язані з забезпеченням необхідної керованості, є домінуючими в загальному процесі проектування, то тема дисертаційної роботи уявляється актуальною.

Метою роботи є розробка ефективних методів розрахунку характеристик КБПА з поворотним крилом, придатних для використання на ранніх стадіях проектування.

При розробці методів проектування КБПА використовувалися методи чисельного моделювання на ЕОМ руху гнучких ниток в потоці рідини, а також методи експериментального дослідження параметрів руху ПБС, які ґрунтуються на проведенні модельних випробувань в гідродинамічній трубі. Оцінка достовірності і точності результатів, отриманих при використанні розроблених методів проектування КБПА, здійснювалася шляхом порівняння розрахункових даних з даними модельного експерименту в дослідному басейні лабораторії гідродинаміки гідрофізичних систем Інституту гідромеханіки АН України (завідуючий - к.т.н. Белінський В.Г.) та натурного експерименту з КБПА "МЗБУ", який був створений в СКТБ Інституту гідромеханіки АН України спільно з вказанов вище лабораторією.

Наукова новизна досліджень і отриманих результатів полягає в тому, що побудована ефективна спрощена математична модель динаміки КБПА з поворотним крилом для оцінки його динамічних якостей на початковій стадії проектування і на її основі отримані залежності, що характеризують зміну глибини і швидкість занурення при маневруванні КБПА в повздовжньо-вертикальній площині з нульовим кутом диференту або нульовим кутом атаки корпусу.

Практична цінність досліджень полягає у тому, що розроблено спосіб визначення параметрів стаціонарного руху БПС, а також побудовані номограми, що дозволяють уже на початковій стадії проектування вибирати гідродинамічні, геометричні і кінематичні характеристики апарата з обумовленими динамічними якостями.

Результати роботи в частині дослідження стаціонарних і нестаціонарних режимів руху КБПА з поворотним крилом використані в СКТБ ІГМ АН України при проектуванні керованого буксируемого підводного апарата "МУБУ".

Основними науковими результатами, які виносяться на захист, є:

1. Номограми для визначення гідродинамічних, геометричних і кінематичних характеристик КБПА з обумовленими динамічними якостями.

2. Практичні рекомендації щодо вибору характеристик КБПА з поворотним крилом на початковій стадії проектування.

3. Спосіб визначення параметрів стаціонарного руху підводних буксируемых систем на початковій стадії проектування, отриманий на основі результатів чисельного експерименту на ЕОМ, зокрема, при стаціонарному русі ПБС в повздовжньо-вертикальній площині, з відведенням буксируемого підводного апарата від діаметральної площини судна-буксира та при використанні в складі ПБС додаткового занурювача.

4. Спрощена математична модель динаміки КБПА з поворотним крилом для оцінки його динамічних якостей на початковій стадії проектування.

5. Залежності, які характеризують зміну глибини і швидкість занурення при маневруванні КБПА в повздовжньо-вертикальній площині з нульовим кутом диференту або нульовим кутом атаки корпусу.

Основні наукові результати, які виносяться на захист.

отримані автором самостійно. В колективних роботах - модельний експеримент в дослідному басейні та натурний експеримент з КБПА "МДБУ" - автор безпосередньо брав участь в їх проведенні, опрацюванні, аналізі та інтерпретації результатів.

Результати досліджень доповідалися на:

- секції наукового забезпечення створення сучасних технічних засобів морської розвідки та видобування корисних копалин Всесоюзної науково-технічної конференції "Проблеми створення нової техніки для освоєння шельфа", м. Астрахань, 12-14 вересня 1984 р.

- секції гідродинаміки технічних систем дослідження Світового океану 3-ї Республіканської науково-технічної конференції з прикладної гідромеханіки, ІГМ АН України, м. Київ, 23-25 жовтня 1984 р.

- секції підводних апаратів, роботів і маніпуляторів 4-ї науково-технічної конференції "Проблеми створення нової техніки для освоєння шельфа", м. Горький, 3-5 грудня 1986 р.

- 2-й Республіканській школі-семінарі молодих науковців та фахівців з теоретичної та прикладної гідромеханіки, м. Алушта, 20-31 жовтня 1986 р.

- секції динаміки буксирюваних та закорених систем 4-ї Республіканської науково-технічної конференції з прикладної гідромеханіки, ІГМ АН України, м. Київ, 24-26 листопада 1987 р.

- Всесоюзній школі по технічним засобам і методам дослідження океану, м. Геленджик, квітень 1989 р.

- секції гідродинаміки технічних засобів освоєння та вивчення океану Республіканської науково-технічної конференції "Проблеми гідромеханіки в освоєнні океану", ІГМ АН України, м. Київ, 24-26 листопада 1992 р., а також на постійно діючих семінарах відділу гідробіоніки та керування граничним шаром ІГМ АН України під керівництвом д.т.н., професора Бабенка В.В. (м. Київ, 27 листопада 1991 р.) і відділу технічної гідромеханіки ІГМ АН України під керівництвом д.ф.-м.н. Салтанова М.В. (м. Київ, 24 квітня 1992 р.).

За матеріалами дисертації опубліковано 9 друкованих робіт, список яких уміщено в кінці автореферата.

Обсяг дисертації становить 109 сторінок машинописного тексту, 52 малюнки, 4 таблиці. Список використаної науково-технічної літератури нараховує 101 найменування.

Короткий зміст роботи

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів і висновків.

У вступі обґрунтовується актуальність теми дисертації, визначається мета досліджень та шляхи її досягнення, приводяться основні наукові результати що виносяться на захист, а також коротко викладено зміст дисертації.

Перший розділ присвячений огляду сучасного стану і перспектив розвитку буксируємих підводних апаратів. Показано, що для розширення функціональних можливостей буксируємих систем до їх складу включаються керовані буксируємі підводні апарати, обладнані системою автоматичного керування рухом. У зв'язку з цим, основною задачею, що стоїть перед конструкторами, є створення нового типу високоманеврового керованого буксируємого підводного апарата, який був би здатний рухатися по складній просторовій траєкторії, при цьому швидкості буксирування повинні бути підвищеними.

Тут же розглянуті існуючі методи проектування буксируємих підводних апаратів. Зокрема, відзначається що в практиці проектування буксируємих підводних апаратів розрізняють два види гідродинамічного розрахунку апарата - попередній та перевірочний. Метою попереднього гідродинамічного розрахунку є відпрацювання гідродинамічної схеми і визначення основних розмірів буксируємого підводного апарата з тим, щоб останній забезпечував виконання вимог технічного завдання на буксируєму систему. Метою перевірочного гідродинамічного розрахунку є остаточне уточнення гідродинамічних характеристик апарата. При цьому, попередній гідродинамічний розрахунок характеризується маловитратністю і пристойною точністю, в той час як перевірочний розрахунок досить трудомісткий і для його виконання необхідне застосування ЕОМ. Підкреслюється, що в дисертаційній роботі розглядаються методи, що використовуються на початковій стадії проектування, а саме при виконанні попереднього гідродинамічного розрахунку апарата.

Особлива увага приділена питанням динаміки підводних апаратів що викладені в роботах Агєєва М.М., Махіна М.М., Пантова Є.І., Шереметова Б.Б., Большакова Ю.І., Войткунського Л.І., Тітова І.О., Першица П.Я., Остославського І.В., Стражевої І.В., Федяєвського К.К., Соболева Г.В. та інш. Відзначається, що буксируємих

підводний апарат необхідно розглядати тільки в складі буксируємої системи. Тому важливе місце в дисертаційній роботі займає аналіз результатів в галузі рішення прикладних задач буксируємих та закорених систем, отриманих Бєловим В.А., Єгоровим В.І., Зарецьким О.В., Криловим О.М., Кульмачем П.П., Іконниковим М.Б., Салтановим М.В. та інш. Тут же розглянуті деякі принципи побудови модульних підводних апаратів та їх систем, які викладені в роботах Дмитрієва О.М., Ястребова В.С., Суворова К.Г., Гайского В.О.

Розглядаються деякі математичні моделі динаміки буксируємих апаратів, зокрема, моделі що викладені в роботах Комарова В.С., Шеремета М.О., Леонтьєва О.О., Попова О.С. та інш.

Важливе місце займає також огляд експериментальних методів визначення гідродинамічних характеристик підводних апаратів, зокрема, методів, викладених в роботах Грейнера Л., Козлова Л.Ф., П'ятецького В.Є., Чорного І.М. та інш.

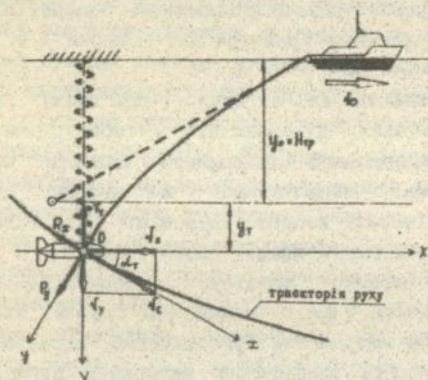
Одочасно необхідно зауважити, що питання, пов'язані з дослідженням впливу гідродинамічних, кінематичних і геометричних характеристик керованого буксируємого підводного апарата на параметри руху нині вивчені недостатньо, а методи що використовуються для їх вирішення досить трудомісткі і мало придатні для застосування на початковій стадії проектування.

В заключній частині першого розділу формується гідродинамічна задача проектування КБПА з поворотним крилом, яка звучить таким чином: при заданих швидкостях буксирування, характеристиках кабель-троса, глибинах та швидкостях занурення знайти необхідні геометричні, кінематичні і гідродинамічні характеристики стернових органів керованого буксируємого підводного апарату з поворотним крилом при маневруванні його в повздовжньо-вертикальній площині з нульовим кутом диферента або нульовим кутом атаки корпусу.

При вирішенні цієї задачі розглядається буксируєма система, яка складається із судна-буксира, буксирно-кабельної частини і керованого буксируємого підводного апарата. При цьому вважається, що КБПА має нульову плавучість, а його метacentрична висота в підводному положенні дорівнює нуль. Вважається також, що при маневруванні керованого БПА по глибині проекція вектора швидкості апарата на вісь OX рухомої системи координат OXY v_x (мал.1) за величиною і напрямком дорівнює швидкості буксирування v_0 . Вертикальна складова реакції кабель-троса на апарат T_y вважається лі-

нійно залежнов від глибини занурення керованого БПА. Проекції гідродинамічних сил (занурювчої сили P_y і сили лобового опору R_x), обчислені в швидкісній системі координат oxy , на вісь OY рухомої системи координат дадуть збудовчу і демпфівувчу сили. Положення швидкісної системи координат відносно рухомої визначається кутом α_T , який чисельно дорівнює куту нахилу траєкторії руху до горизонту.

Враховувчи ці допущення та зауваження, задача динаміки керованого БПА з поворотним крилом при маневруванні його з нульовим кутом диферента або нульовим кутом атаки корпусу зводиться до розгляду задачі про переміщення тіла з однією ступінню свободи на пружній підвісі.



Мал. 1. До постановки гідродинамічної задачі проектування КБПА

Для вирішення цієї основної задачі необхідно вирішити дві проміжні задачі. По-перше, необхідно визначити структуру і чисельне значення залежності вертикальної складової реакції кабель-троса на апарат від швидкості буксирування, геометричних, вагових та гідродинамічних характеристик кабель-троса. По-друге, необхідно з'ясувати структуру і чисельне значення залежностей гідродинамічних характеристик керованого БПА від геометричних і кінематичних параметрів стернових органів апарата. Побудувати математичну модель гідродинамічних характеристик апарата і визначити межі її застосування. Вирішення першої проміжної задачі ґрунтується на аналізі результатів чисельного експерименту на ЕОМ з використанням деяких математичних моделей троса в потоці рідини, які себе добре зарекомендували, а також слушність прийня-

тих при постановці задачі допущень та зауважень викладені у 3-у розділі дисертації. Вирішення другої проміжної задачі, що ґрунтується на модифікації найвемпіричного метода обчислення гідродинамічних характеристик, який запропонований гідродинамічним відділенням центру берегових систем ВМС США, стосовно керованого БПА, викладене у другому розділі дисертації.

Отже, у другому розділі розглянуті основні геометричні і гідродинамічні характеристики КБПА з поворотним крилом. Зокрема, проведено аналіз і порівняння відомих гідродинамічних схем та компоновок БПА ("нормальна" схема, схема "качка" та схема "літаче крило"). Наводяться рекомендації що до вибору параметрів крил, корпусу та кормового оперення КБПА. Робиться висновок про те, що для реалізації руху КБПА по просторовій траєкторії найбільш прийнятною є двокорпусна "нормальна" гідродинамічна схема апарата середньопланого типу, обладнаного крилом з малим діапазоном переміщення центра тиску. Тут же наводяться спрощені залежності гідродинамічних характеристик КБПА у вигляді ізольованого корпусу, обладнаного поворотним крилом і кормовим оперенням, до складу якого входять стабілізатор і горизонтальне стерно. Зокрема, якщо КБПА рухається у позадвожно-вертикальній площині, то вони мають вигляд:

$$C_y = C_y^k K_{kr} + C_y^f \frac{F_m}{F} (1+K_a+K_o) + C_y^s \frac{F_o}{F} (1+K_o);$$

$$C_x = C_{x0} + B (C_y)^2;$$

$$C_{m_z} = C_{m0} \frac{Y_R}{B} + B(C_y)^2 \frac{Y_F}{B} + C_y^k K_{kr} \frac{x_F}{B} + C_y^f \frac{F_m}{F} (1+K_a+K_o) \frac{x_R}{B} + C_y^s \frac{F_o}{F} (1+K_o) \frac{l_P}{B};$$

де C_y, C_x, C_{m_z} - відповідно коефіцієнт занурювчої (підіймальної) сили, сили лобового опору та позадвожного момента КБПА;

C_y^k, C_y^f, C_y^s - відповідно коефіцієнт занурювчої (підіймальної) сили ізольованих крила, корпусу та оперення КБПА;

K_{kr}, K_a, K_o - коефіцієнти інтерференції;

F_m - площа міделєвого перетину;

F - площа крила в плані;

b - хорда крила;

x_F, y_F - координати центра тиску крила;

x_R, y_R - координати прикладення сили опору і занурювчої

- (підіймальної) сили на корпусі БПА;
 L_p - координата прикладення занурюючої (підіймальної) сили горизонтального стерна;
 $B=1/(\pi\lambda_e)$ - коефіцієнт пропорційності (тут λ_e - ефективне видовження крила.

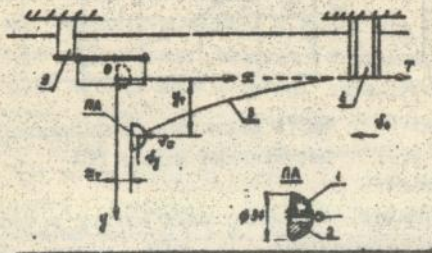
В кінці другого розділу наводяться результати порівняння обчислень при застосуванні спрощених залежностей гідродинамічних характеристик з експериментальними даними, які отримані шляхом проведення серії випробувань моделі керуваного БПА "МБУ" в дослідному басейні лабораторії гідродинаміки гідрофізичних систем ІГМ АН України, який має довжину 140 м, ширину 4 м і глибину 1,6...1,8 м. Модель мала довжину корпусу 1019 мм і розмах крил 900 мм. Швидкість буксирування становила 5,5 м/с. Кожне випробування характеризувалося кінематичними параметрами руху: кутом атаки корпусу моделі, кутом перекидки крила та кутом перекидки горизонтального стерна. Результати випробувань представлялися у вигляді графічних залежностей коефіцієнтів гідродинамічних сил і момента від кінематичних параметрів руху. Тут же робиться висновок про те, що межі застосування спрощених залежностей гідродинамічних характеристик керуваного БПА витікають із умови безвідривного обтікання стернових поверхонь і становлять:

- по куту атаки крила і куту атаки кормового горизонтального стерна 18...20°;
- по куту атаки корпусу БПА 20...25°.

При цьому похибка при обчисленні гідродинамічних характеристик керуваного БПА з поворотним крилом не буде перевищувати 10%, що цілком задовільно для початкової стадії проектування БПА.

Третій розділ присвячений дослідженню динаміки КБПА з поворотним крилом. Розглянуто основні рівняння динаміки КБПА і визначено шляхи їх спрощення, слушність яких визначалася шляхом проведення в гідродинамічній трубі відділу гідробіоніки та керування граничним шаром ІГМ АН України експериментальних досліджень динаміки підводної буксирної системи. Гідродинамічна труба мала закриту прямокутної (400 x 400 мм) форми в поперечному перетині робочу частину довжиною 1500 мм. Для досліджень була виготовлена модель підводного апарата (ПА) (див. мал.2) у вигляді півкулі діаметром 37 мм, причому верхня частина півкулі була заповнена пінопластом (1), а в нижній частині - розміщувався свинцевий

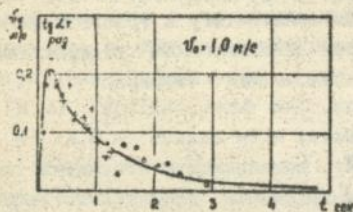
тягарець (2), який забезпечував моделі ПА занурювчу силу 0,0706 Н. Модель ПА за допомогою троса (3), який був виготовлений із капронової волосіні діаметром 0,6 мм і довжиною 830 мм з'єднувався з тензометричним динамометром (4), який дозволяв реєструвати на стрічці шлейфного осцилографа силу натягу T . Вниз за течією в трубі розташовувався пристрій автоматичного відпускання моделі (5), причому момент відпускання синхронно реєструвався на стрічці шлейфного осцилографа поруч з записом сили натягу в тросі. Відлік часу з моменту спрацювання пристрою автоматичного відпускання моделі ПА здійснювався за допомогою спеціального таймера.



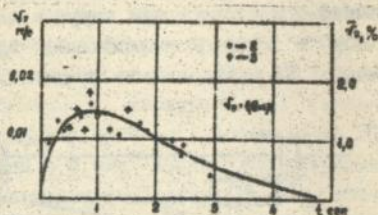
Мал. 2. Схема експериментальної установки

Методика проведення експериментів була такою. Перед тим, як надати воді в трубі швидкості, динамометр і таймер виставлялися в нульові позначки. Потім модель ПА розміщувалася в направляючій рамці пристрою автоматичного відпускання і воді в гідродинамічній трубі надавалася швидкість $v_0 = 1,0$ м/с. Направляюча рамка обмежувала переміщення моделі ПА тільки по глибині, а в позадознобному напрямку модель могла вільно рухатися. Тому модель ПА під натиском набігаючого потоку переміщувалася вниз за течією до тих пір, поки трос не витгувався у пряму лінію. Цей стан моделі ПА позначений на мал. 2 пунктирною лінією. Далі приводився у дію пристрій автоматичного відпускання і модель ПА починала занурюватися. Процес занурення моделі ПА реєструвався на кінострічку з частотою 24 кадри на секунду за допомогою кінокамери "Конвас-автомат". Кінематичні характеристики процесу занурення моделі ПА - швидкість занурення v_y і швидкість позадознобного переміщення v_x - обчислювалися шляхом графічного диференціювання відповідно глибини занурення y_T і позадознобного переміщення x_T . На мал. 3 і 4 зображені результати цих обчислень. Так, зокрема,

швидкість занурення v_y після введення в дію пристроїв автоматичного відпускання за досить короткий час набувала максимальної величини 0,2 м/с, а потім повільно впродовж майже 4-х секунд спадала до нуля. Побудована швидкість v_x при цьому була більш як на порядок менше (максимальна величина $v_{x \max} = 0,015$ м/с) і відносно швидкості руху води в гідродинамічній трубі становила $\bar{v}_x = (v_x / v_0) 100\% = 1 \dots 1,5\%$.

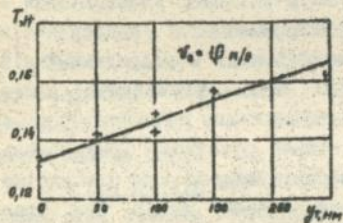


Мал. 3. Швидкість занурення моделі БПА

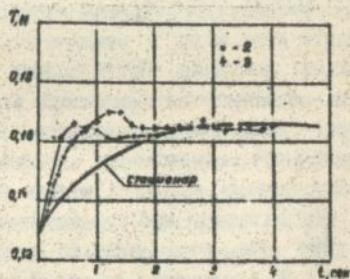


Мал. 4. Швидкість позадозного переміщення моделі БПА

На мал. 6 показані результати порівняння сили натягу в тросі T , яка виникає в процесі занурення, і сили натягу при стаціонарному русі ПА (мал. 5) на однакових глибинах занурення.



Мал. 5. Залежність сили натягу в тросі від стаціонарної глибини занурення



Мал. 6. Сила натягу в тросі при зануренні моделі БПА

Видно, що в початковий момент часу нестационарна сила дорівнює стаціонарній. Далі нестационарна сила перевищує стаціонарну і її розвиток з часом може супроводжуватися певними сплесками і падінням, в той час як стаціонарна сила збільшується монотонно.

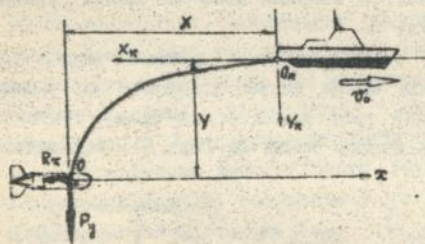
Починаючи з 2-ї секунди і далі стаціонарні і нестационарні сили знову зрівнюються. При цьому відхилення нестационарних сил натягу від стаціонарних не перевищує 10...12%. Слід також зауважити, що буксирувана система, динаміка якої досліджувалася, мала досить високі динамічні характеристики. Зокрема, максимальний кут нахилу траєкторії руху ПА відносно горизонту сягав $\arctg(v_y/v_x) = 11...12^\circ$ (див. мал. 3), що є характерним для керованих БПА.

В результаті досліджень робиться висновок про те, що:

1. Швидкість повздовжніх переміщень БПА відносно судна-буксира мала по відношенню до швидкості буксирування і нею в задачі динаміки можна знехтувати.

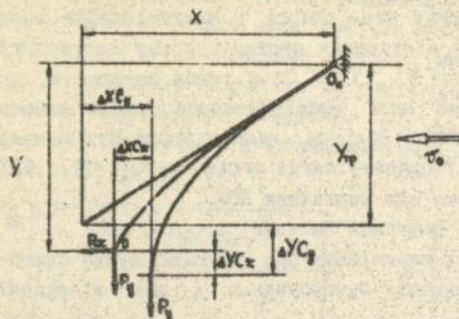
2. Залежність натягу в тросі від глибини занурення в задачі динаміки БПА можна вважати близькою до прямопропорційної, а величина натягу при визначенні характерних рухів БПА може бути обчислена з результатів вирішення задачі стаціонарного руху гнучкої нитки в рідині і використана в задачі динаміки БПА.

Тут же розглянуто задачу про стаціонарний рух буксируемого підводного апарата. Розглянуто випадки руху апарата в повздовжньо-вертикальній площині, рух апарата з відведенням та додатковим занурвачем. Зокрема, при русі БПА в повздовжньо-вертикальній площині (мал. 7) для ряду геометричних, кінематичних та гідродинамічних характеристик троса виконані розрахунки за методами О. М. Крилова та М. В. Салтанова параметрів руху буксируемого апарата.



Мал. 7. Система координат і параметри руху ПБС

Після аналізу результатів розрахунків отримані алгебраїчні емпіричні формули що характеризують залежність параметрів руху апарата (глибини занурення, відставання та зідведення) від гідродинамічних характеристик апарата. Ключовим моментом при цьому було положення про те, що глибина занурення Y та відставання апарата X були представлені у такому вигляді (мал. 8)



Мал. 8. Схема визначення параметрів руху ПЕС

$$Y = Y_{TP} + \Delta Y_{Cy} - \Delta Y_{Cx};$$

$$X = X_{TP} - \Delta X_{Cy} - \Delta X_{Cx};$$

де Y_{TP} - глибина занурення вільного троса, м;

ΔY_{Cy} - добавка до глибини обумовлена дією на кінці троса занурюючої сили P_y , м;

ΔY_{Cx} - добавка до глибини, обумовлена дією на кінці троса силлобового опору R_x , м;

X_{TP} - відставання кінця вільного троса від судна-буксира, м;

ΔX_{Cy} - добавка до відставання, обумовлена дією на кінці троса занурюючої сили P_y , м;

ΔX_{Cx} - добавка до відставання, обумовлена дією на кінці троса сили лобового опору R_x , м.

Якщо трос має рівномірно розподілену по довжині масу, то координати кінця вільного троса можна легко відшукати із умови рівноваги троса. В цьому випадку трос являє собою пряму лінію і розглядаючи рівняння моментів відносно точки O_k (мал. 8), отримаємо

$$Y_{TP} = S \left(\sqrt{\left(\frac{g_b}{\Gamma}\right)^2 \frac{1}{4} + \left(\frac{g_b}{\Gamma}\right)^2 - \frac{g_b^2}{2\Gamma^2}} \right)^{1/2}; \quad X_{TP} = S \left(\sqrt{\left(\frac{g_b}{\Gamma}\right)^2 \frac{1}{4} - 1 - \frac{g_b}{\Gamma}} \right);$$

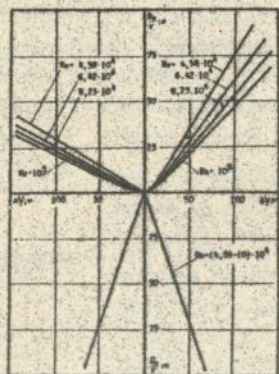
де S - загальна довжина троса, м;

g_b - погонна вага троса в воді, кг/м;

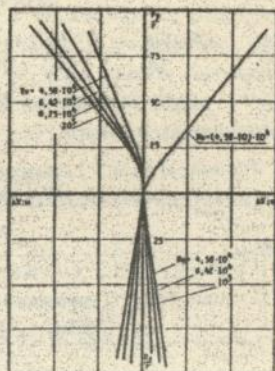
Γ - погонний опір троса при поперечному обтіканні, кг/м.

Добавки ΔY_{Cy} , ΔY_{Cx} , ΔX_{Cy} і ΔX_{Cx} обчислені в залежності від співвідношень P_y/Γ і R_x/Γ , які вважаються характерними для процесу

буксирування ПБС, зображені на мал.9 і 10. Зокрема, на правій частині мал.9 зображені залежності $\Delta Y_{Cy} = f(P_y/\gamma)$ і $\Delta Y_{Cx} = f(R_x/\gamma)$ у випадку, коли сила P_y направлена вниз (занурююча). На лівій половині графіка зображені ці ж залежності у випадку, коли сила P_y направлена вгору (підіймальна).



Мал.9. Залежність поправок ΔY від величин P_y/γ і R_x/γ



Мал.10. Залежність поправок ΔX від величин P_y/γ і R_x/γ

Видно, що добавки ΔY_{Cy} і ΔY_{Cx} прямопропорційно залежать від співвідношень P_y/γ і R_x/γ . Аналогічного типу залежності отримані і для добавок ΔX_{Cy} та ΔX_{Cx} (мал.10). Залежності, зображені на мал.9 і 10, апроксимовані простими формулами, до складу яких входять число Рейнольдса, коефіцієнт занурюючої (підіймальної) сили апарата, коефіцієнт лобового опору апарата, площа крила БПА в плані, коефіцієнт опору троса при нормальному обтіканні та його діаметр. Визначені межі застосування отриманих формул. Як показала перевірка, з використанням опублікованих експериментальних даних по буксируванню рибоподібного грузила вагов 500 кг похибка в обчисленні глибини занурення Y та відставання X при використанні цих формул не перевищує 5%.

Також отримана залежність вертикальної складової реакції кабель-троса на апарат від глибини занурення у вигляді

$$T_y = \frac{K}{K_1} Y_T,$$

де K_1 - коефіцієнт що залежить від швидкості буксирування і напрямку дії реакції кабель-троса;

Таким чином, тривалість виконання маневру t_m і максимальний кут нахилу траєкторії руху α_T^{\max} будемо вважати критеріями, що характеризують динамічні якості КБПА.

Диференційне рівняння, що характеризує рух КБПА по глибині з нульовим кутом диферента, буде мати вигляд

$$(m+\lambda_{zz}) y_T'' + \left[\left(\frac{dC_k}{d\alpha} \right)^{\text{II}} + \left(\frac{dC_y}{d\alpha} \right)^{\text{II}} \right] \frac{\rho \omega_0}{2} F y_T' + \left[\frac{1}{K_1} \right] y_T = \left(\frac{dC_k}{d\alpha} \right)^{\text{II}} \delta_k \frac{\rho \omega_0^2}{2} F;$$

де $(m+\lambda_{zz})$ - маса апарата з урахуванням присьднаної маси;

y_T', y_T'' - швидкість та прискорення руху апарата по глибині;

$\left(\frac{dC_k}{d\alpha} \right)^{\text{II}}$ - похідна коефіцієнта занурвчої (підіймальної) сили крила по куту атаки, відкоректована з урахуванням взаємодії крила з корпусом;

$\left(\frac{dC_y}{d\alpha} \right)^{\text{II}}$ - похідна коефіцієнта занурвчої (підіймальної) сили опереного корпусу, відкоректована з урахуванням взаємодії корпусу з крилом і оперенням;

ρ - масова густина води;

ω_0 - швидкість буксирування;

F - площа крила в плані.

Рішення рівняння руху КБПА по глибині отримано у вигляді

$$y_T = \left(\overline{P}_y \frac{K_1}{F} - y_0 \right) \left[1 - \frac{e^{S_1 t}}{\left(1 - \frac{S_1}{S_2} \right)} + \frac{e^{S_2 t}}{\left(1 - \frac{S_2}{S_1} \right)} \right] + y_0;$$

$$\text{де } \overline{P}_y = \left(\frac{dC_k}{d\alpha} \right)^{\text{II}} \delta_k \frac{\rho \omega_0^2}{2} F;$$

y_0 - початкова глибина занурення апарата відносно глибини занурення вільного троса.

$S_{1,2}$ - корні характеристичного рівняння що визначаються за формулою

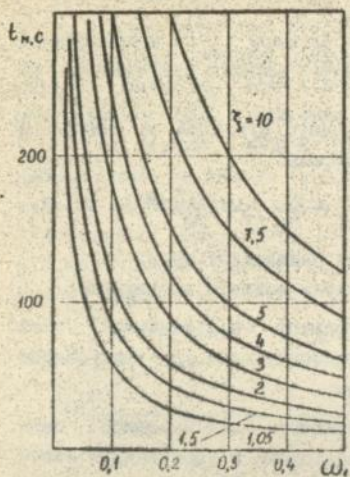
$$S_{1,2} = \frac{a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_0 a_2}}{2 a_0};$$

де $a_0 = (m+\lambda_{zz})$;

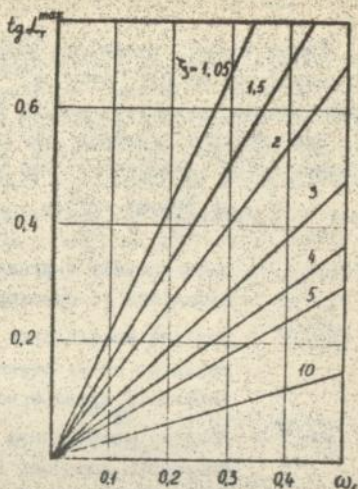
$$a_1 = \left[\left(\frac{dC_k}{d\alpha} \right)^{\text{II}} + \left(\frac{dC_y}{d\alpha} \right)^{\text{II}} \right] \frac{\rho \omega_0}{2} F;$$

$$a_2 = \frac{1}{K_1};$$

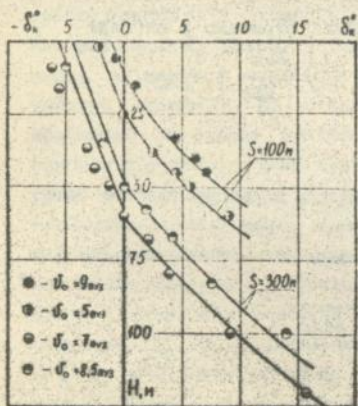
Швидкість маневрування по глибині при цьому буде мінятися по такій залежності



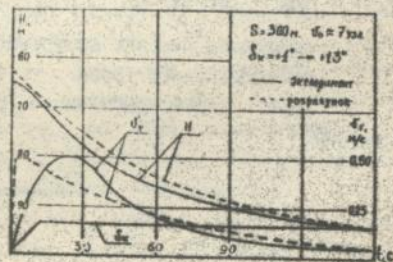
Мал. 12. Залежність тривалості виконання маневру КБПА від параметрів ξ і ω .



Мал. 13. Залежність максимального кута нахилу траєкторії руху КБПА від параметрів ξ і ω .



Мал. 14. Порівняння розрахункової залежності глибини занурення від кута перекладки крила МУБУ з даними натурального експерименту при стаціонарних режимах руху.



Мал. 15. Характер зміни глибини занурення КБПА при маневруванні з нульовим кутом диферента.

$$y'_T = \left(\overline{P}_y \frac{K_L}{F} - y_0 \right) \left[\frac{e^{S_2 t}}{\left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right)} - \frac{e^{S_1 t}}{\left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)} \right];$$

В четвертому розділі на основі результатів двох попередніх розділів проведено дослідження залежності параметрів маневра по глибині від основних геометричних, кінематичних і гідродинамічних характеристик КБПА. За критерії, що характеризують динамічні якості апарата, правлять тривалість виконання маневра t_m і максимальний кут нахилу траєкторії руху апарата α_T^{max} для яких на основі спрощеної математичної моделі динаміки КБПА з поворотним крилом отримані такі залежності від основних гідродинамічних, геометричних і кінематичних характеристик апарата:

- для тривалості виконання маневра

$$t_m \approx \frac{1}{S_1} \ln[0,05 \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)]$$

- для максимального кута нахилу траєкторії

$$\lg \alpha_T^{max} \approx \omega_1 (1,87 - 0,74 \ln \xi)$$

де $\omega_1 = \sqrt{a_2/a_0}$ - коефіцієнт-аналог власної кругової частоти;

$\xi = \frac{a}{\sqrt{4a_0 a_2}}$ - коефіцієнт згасання.

Також побудовані номограми (мал.12 і 13), які дозволяють вибирати гідродинамічні, геометричні і кінематичні характеристики КБПА з поворотним крилом що забезпечують апарату задані динамічні якості. Тут же наводяться результати порівняння розрахункових даних з даними натурального експерименту з керованим БПА "МУБУ". Зокрема, приводяться результати порівняння розрахункових даних (суцільна лінія) з експериментальними при стаціонарних режимах руху (мал.14) та при виконанні апаратом маневру занурення з нульовим кутом диферента (мал.15). Робиться висновок про те, що розроблені методики дають задовільний результат і можуть бути використані на ранніх стадіях проектування КБПА з поворотним крилом.

Основні результати і висновки роботи можна сформулювати у вигляді таких положень:

1. На основі аналізу гідродинамічних схем керованих буксируємих підводних апаратів з поворотним крилом зроблено висновок про те, що найбільш прийнятнов є двокорпусна "нормальна"

гідродинамічна схема з крилом симетричного профілю і відносним видовженням $\lambda = 3$, яке розташоване відносно корпусу по схемі середньогоплана.

2. Проаналізовано схему маневрування КБПА по глибині і визначено, що за критерії, які характеризують динамічні якості апарата можуть правити тривалість виконання маневру t_m і максимальний кут нахилу траєкторії руху апарата α_T^{\max} . Для них на основі спрощеної математичної моделі динаміки КБПА з поворотним крилом отримані залежності від основних гідродинамічних, геометричних і гідродинамічних характеристик апарата. Побудовані номограми, які дозволяють визначати на початковій стадії проектування невідомі характеристики керованого БПА з заданими динамічними якостями за умови, що КБПА здійснює аперіодичний рух по глибині в позаддовжньо-вертикальній площині.

3. На основі чисельного експерименту на ЕОМ запропонована методика обчислення на початковій стадії проектування параметрів буксирних систем, зокрема, при стаціонарному русі буксирної системи в позаддовжньо-вертикальній площині. Суть методики полягає в тому, що використовувачи принцип суперпозиції параметри руху БПА (глибина занурення та відставання) представляються у вигляді трьох складових частин, одна із яких визначається характеристиками троса, друга - дією занурючої (підіймальної) сили, а третя - дією сили лобового опору апарата. Для кожної із складових частин отримано прості алгебраїчні залежності від кінематичних, геометричних та гідродинамічних характеристик троса та апарата. Показано, зокрема, що залежність вертикальної складової реакції троса на апарат близька до прямо пропорційної. Розроблена методика поширена на випадки руху БПА з відведенням від діаметральної площини судна-буксира і при використанні в складі буксирної системи додаткового занурювача. Отримано ряд якісних результатів, зокрема, показано, що раціональна гідродинамічна якість відхилювача лежить в межах 5, а місце розташування додаткового занурювача по довжині троса має істотний вплив на глибину занурення коли додаткова глибина занурення втричі менша за довжину троса від додаткового занурювача до судна-буксира.

4. На основі модифікації методу обчислення гідродинамічних характеристик підводних апаратів NCSSC розроблені для початкової стадії проектування спрощені залежності гідродинамічних характеристик керованого БПА у вигляді

ізолюваного корпусу, обладнаного поворотним крилом і кормовим оперенням, до складу якого входять стабілізатор і горизонтальне стерно. В залежностях гідродинамічних характеристик враховані сили що діють на ізолювані крило, корпус і оперення, а також додаткові величини цих же сил, обумовлені інтерференцією корпусу з крилом, крила з корпусом, корпусу з оперенням та оперення з корпусом через коефіцієнти інтерференції. Шляхом проведення модельного експерименту визначені межі їх застосування що становлять по куту атаки крила і куту атаки кормового оперення $18...20^\circ$, а по куту атаки корпусу БПА $20...25^\circ$.

5. Розроблена спрощена математична модель динаміки керованого підводного апарата з поворотним крилом, яка дозволяє на початковій стадії проектування вивчати режими маневрування по глибині з нульовим кутом диференту або з нульовим кутом атаки корпусу апарата. Основними спрощувчими факторами є положення про те, що вертикальна складова реакції кабель-троса на апарат лінійно залежить від глибини занурення КБПА і проекція вектора швидкості апарата на вісь ОХ рухомої системи координат ОКУ за величиною і напрямком дорівнює швидкості буксирування. Враховуючи ці допущення, задача динаміки КБПА з поворотним крилом при маневруванні його з нульовим кутом диференту або нульовим кутом атаки корпусу зведена до розгляду задачі про переміщення тіла на пружній підвісці. Слушність основних спрощувчих положень що використані при розробці математичної моделі, перевірялися шляхом проведення модельного експерименту по вивченню динаміки підводної буксированої системи, а достовірність результатів, отриманих при застосуванні розробленої математичної моделі динаміки керованого БПА, перевірялася шляхом проведення натурального експерименту, який показав задовільну відповідність між експериментальними і розрахунковими даними якщо максимальний кут нахилу траєкторії руху КБПА відносно горизонту не перевищує $10...15^\circ$, що є характерним для керованих БПА.

Основний зміст дисертації викладено в таких роботах:

1. Акименко И. П., Белинский В. Г., Мороз В. В. Оценка параметров движения подводных буксированных систем на ранней стадии проектирования // Проектирование и конструкции судов: Сб. науч. тр. - Николаев: НКИ-1982-с.12-17.

2. Акименко И.П., Белинский В.Г., Мороз В.В. К определению глубины погружения подводной буксируемой системы с двумя углубителями// Совершенствование судовых устройств и гибких конструкций: Сб. науч. тр. - Николаев: НКИ-1985-с.58-61.

3. Белинский В.Г., Зинчук П.И., Мороз В.В. и др. К определению гидродинамических характеристик подводных буксируемых аппаратов в начальной стадии проектирования// Проблемы гидромеханики в освоении океана: Материалы 3-й республ. конф. по прикладной гидромеханике- Киев: ИГМ АН УССР-1984- часть 2-Б- с.50.

4. Белинский В.Г., Калюх Ю.И., Мороз В.В. Оценка параметров движения отводителя на ранней стадии проектирования// Совершенствование судовых устройств и гибких конструкций: Сб. науч.тр. - Николаев: НКИ-1984- с.22-26.

5. Белинский В.Г., Мороз В.В. Исследование параметров движения подводной буксируемой системы в начальной стадии проектирования// Проблемы гидромеханики в освоении океана: Материалы 4-й республ. конф. по прикладной гидромеханике- Киев: ИГМ АН УССР-1987- часть 2 - с.27-28.

6. Белинский В.Г., Мороз В.В. Определение параметров движения подводной буксируемой системы в начальной стадии проектирования// Проблемы гидромеханики в освоении океана: Материалы 3-й республ. конф. по прикладной гидромеханике- Киев: ИГМ АН УССР-1984- часть 2-Б- с.51.

7. Мороз В.В., Белинский В.Г. Исследование динамики управляемого буксируемого подводного аппарата// Технические средства и методы освоения океанов и морей: Тезисы докладов Всесоюзной школы - Москва: ИО АН СССР - 1989- том.1- с.137.

8. Мороз В.В. К вопросу определения параметров буксируемого подводного аппарата с заданными динамическими свойствами// Проектирование средств освоения океана: Сб. науч. тр. - Николаев: НКИ - 1991- с.10-17.

9. Мороз В.В. Гидродинамические аспекты проектирования управляемого буксируемого подводного аппарата с поворотным крылом// Проблемы гидромеханики в освоении океана: Материалы конф. по прикладной гидромеханике- Киев: ИГМ АН Украины- 1992- с.44-45

462205

AB 29.749

AB 29.749