

УДК 532.528

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ Й КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ СУПЕРКАВІТУЮЧИХ ТІЛ, ЩО ПРОНИКАЮТЬ У ВОДУ ПІД МАЛИМИ КУТАМИ ДО ВІЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ

Ю. М. Савченко, В. М. Семененко[†], Г. Ю. Савченко, О. І. Наумова

Інститут гідромеханіки НАН України
вул. Марії Капніст, 8/4, 03057, Київ, Україна
[†]E-mail: vnsvns60@gmail.com

Отримано 25.09.2025 ◇ Прийнято 02.02.2026 ◇ Опубліковано 03.09.2026

Розроблено методику експериментального дослідження входу та проникнення у воду моделей, що вільно летять під малими кутами до горизонту. Випробування щодо проникнення моделі у воду з початковими швидкостями від 10 м/с до 25 м/с проведено для значень кутів від 4° до 15°. Отримано кінограми руху моделей і розвитку каверн шляхом швидкісної відео-реєстрації (швидкість зйомки 1000 кадрів на секунду). У результаті обробки кінограм отримано експериментальні графіки залежності швидкості моделі, пройденої відстані і кута тангажу моделі від часу. Описано чотири типи динамічної поведінки моделей: проникнення у воду в режимі суперкавітації; підводний рикошет (відскок); підводне перекидання моделі; поверхневий рикошет. Дано оцінку впливу положення центру мас моделі на динаміку моделі після входу у воду. Показано, що моделі із центром мас, зсунутим до корми, мають меншу стійкість до відхилень. Уточнено математичну модель і методику розрахунку динаміки суперкавітуючих моделей, засновану на принципі незалежності розширення перерізів каверни Г. В. Логвиновича, шляхом урахування впливу вільної поверхні води на форму стаціонарних та нестаціонарних суперкаверн. Розроблену методику розрахунку реалізовано у вигляді демонстраційних комп'ютерних програм DIVE. Наведено приклади комп'ютерного моделювання гідродинамічних процесів при вході і проникненні різних моделей у воду. Дано оцінку ймовірності рикошету від поверхні води різних моделей на площині початкових параметрів входу у воду. Порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними показує, що дана уточнена математична модель дозволяє з задовільною точністю передбачити основні особливості гідродинамічних процесів при русі суперкавітуючих моделей на малих відстанях від поверхні води та при вході і проникненні моделей у воду під малими кутами до поверхні води.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: вхід у воду, суперкавітація, динаміка, рикошет, комп'ютерне моделювання

1. ВСТУП

В статті розглядаються гідродинамічні процеси, що виникають при перетині моделями вільної поверхні води та подальшому проникненні суперкавітуючих моделей у воду під малим кутом до горизонту. У процесі проникнення за моделлю з кавітатором створюється каверна, наповнена атмосферним повітрям.

Особлива увага до вивчення гідродинаміки і динаміки тіл при вході у воду в під малими кутами до горизонту викликана необхідністю забезпечити безрикошетний вхід в воду і задану траєкторію руху моделей у воді. Експериментальні дослідження процесу входу у воду під малими кутами до горизонту, включаючи явище рикошету, проводилися останнім часом у ряді країн (див., наприклад, [1–7]).

Проведені дослідження показали, що траєкторія моделей після входу у воду може дуже відрізнятися від прямолінійної, особливо у випадку малих кутів входу (аж до рикошету). У ряді сучасних робіт цей феномен називають "нестійкість похилого входу у воду". Однак, строго кажучи, він ніяк не пов'язаний зі стійкістю руху в традиційному розумінні, а повністю визначається дією гідродинамічних сил, що виникають на початковому етапі входу, та значеннями параметрів, які стабілізують модель.

У випадку похилого входу у воду під кутом γ до горизонту швидкість входу $\vec{V}_0$ має як вертикальну, так і горизонтальну складову. При цьому вісь тіла може бути нахилена до напрямку руху під кутом атаки α і може мати кутову швидкість відносно центру мас ω_z (див. Рис. 1). У початковий період похилого входу гідродинамічна сила $\vec{F}$ прикладена до носової частини тіла і спрямована не вздовж осі симетрії тіла, тому поряд з опором вона створює перекидальний момент M_z . Це може призвести до відхилення траєкторії моделі вгору і навіть до такого явища, як рикошет.

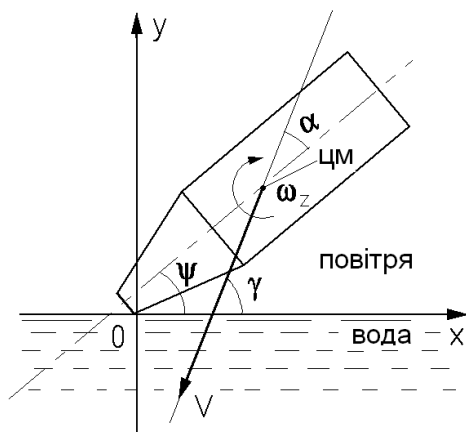


Рис. 1. Схема похилого входу моделі у воду

В Інституті гідромеханіки НАН України експериментальні дослідження входу у воду під малими кутами до вільної поверхні проводяться з 2018 року. З цією метою в Лабораторії сучасної гідродинаміки Інституту було створено експериментальну установку на основі прозорої робочої ділянки ГДТ та пневматичної катапульти, яка дозволяла вистрілювати довгий тонкий шток із моделлю на кінці під кутами до поверхні води $\gamma = (4 \dots 15)^\circ$ зі швидкостями до $V_0 = 25$ м/с [8]. На початковому етапі роботи основна увага приділялася експериментальному дослідженню форми каверни, яка утворюється за диском при проникненні у воду під малими кутами до вільної поверхні. У цьому випадку дисковий кавітатор жорстко кріпився

до штоку катапульти, що забезпечувало його прямолінійний рух. Було показано, що каверна, що утворюється, має несиметричну форму відносно прямолінійної траєкторії руху [8]. Це пояснюється впливом близької вільної поверхні.

Метою даної роботи було проведення експериментальних досліджень динаміки вільного руху моделей, що проникають у воду під малими кутами до вільної поверхні, та

уточнення методики її комп'ютерного моделювання. З цієї метою експериментальна установка була модифікована.

В статті стисло описано модифіковану експериментальну установку та методику проведення випробувань. Наведено приклади отриманих кінограм різних типів динамічної поведінки моделей при вході та проникненні у воду, описано методики обробки кінограм. Наведено експериментальні графіки зміни параметрів руху моделі для різних значень початкових параметрів при вході у воду.

Теоретичні дослідження гідродинамічних процесів при похилому вході тіл у воду, включаючи явище рикошету, через складність задачі проводилися виключно чисельними методами CFD (див., наприклад, [9–12]).

Нами розроблено методику розрахунку та комп'ютерного моделювання динаміки суперкавітуючих моделей на основі апроксимаційної математичної моделі принципу незалежності розширення перерізів нестационарних суперкаверн Г.В.Логвиновича [13–15]. У даній роботі вона модифікована шляхом урахування впливу вільної поверхні води на форму суперкаверн та застосована для розрахунку гідродинамічних процесів при вході та проникненні моделей у воду під довільними кутами до горизонту. Розроблену методику розрахунку реалізовано у вигляді демонстраційних програм DIVE різних версій. Наведено приклади комп'ютерного моделювання досліджуваних процесів, дано порівняння з експериментальними даними.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ

2.1. Експериментальна установка

Для випробувань використовувалася модифікована експериментальна установка на основі пневматичної катапульти [8]. На відміну від [8], де кавітатор жорстко кріпився на кінці штока катапульти, моделі вільно насаджуються на нього, а у останньому варіанті розганяються без штоку. Схему експериментальної установки наведено на Рис. 2.

На схемі позначено: 1 – модель; 2 – шток; 3 – пристрій гальмування штока; 4 – стопорний пристрій (ластівка); 5 – кран (заслінка пуску); 6 – манометр; 7 – стравлення – регулювання тиску; 8 – накопичувач – акумулятор стисненого повітря; 9 – ресивер; 10 – ствол катапульти; 11 – інформаційна табличка; 12 – вода; 13 – захисна гума (уловлювач); 14 – лоток прозорий; 15 – світлова панель; 16 – відеокамера; 17 – компресор; 18 – зона фото-фіксації; 19 – пиж; 20 – відсікач повітря. Довжина ствола катапульти 180 см (варіант а) або 110 см (варіант б), внутрішній діаметр ствола 43 мм.

У першому варіанті при виході штока зі ствола шток різко гальмується за допомогою пристрою 3, при цьому модель сходить зі штока і продовжує рух за інерцією. У безштоковому варіанті модель з пижом 19 також продовжує інерційний рух у повітрі. В цьому випадку для зменшення впливу супутнього струменю стиснутого повітря на модель та вільну поверхню води на кінець катапульти було додано циліндр-глушник з широкими прорізами 20.

Процес проникнення моделі у воду реєструється за допомогою світлової панелі 15 та швидкісної відеокамери 16 (швидкість зйомки 1000 кадрів за секунду). Випробування проводилися при швидкості входу моделей у воду $V_0 = (10 \dots 20)$ м/с при кутах нахилу ствола катапульти до поверхні $\alpha_c = 15^\circ, 10^\circ$ і близько 5° . Моделі витискаються в канал

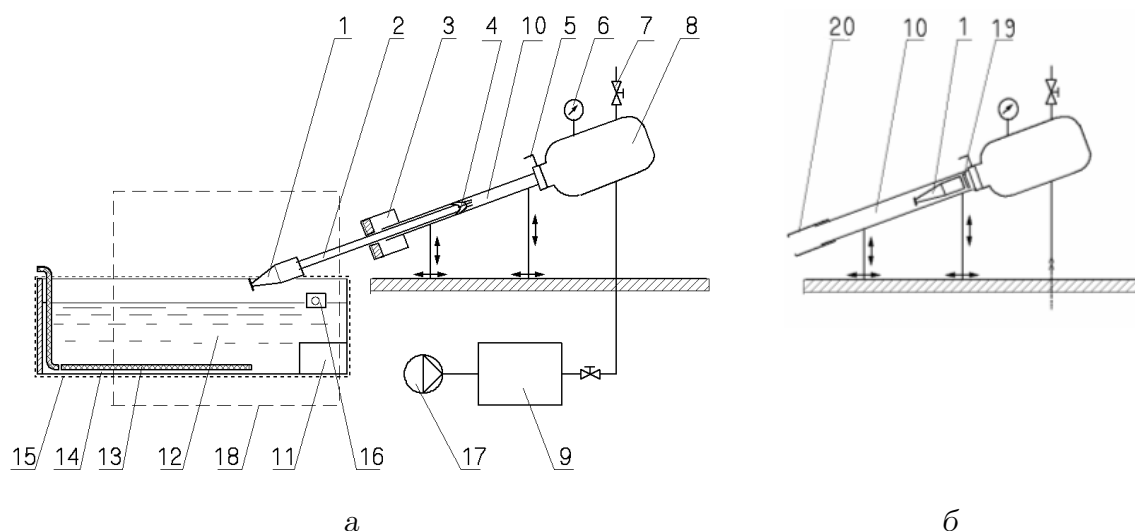


Рис. 2. Схема установки:
а — зі штоком; б — без штока

з прозорими стінками з поточною глибиною $H = 0.36$ м і шириною 0.34 м, обладнаний уловлюючим пристроєм 13.

Описана конструкція пневматичної катапульти дозволяє розганяти модель під встановленим кутом нахилу ствола катапульти α_c . При підході до вільної поверхні модель входить у воду з деяким початковим кутом γ і початковою швидкістю V_0 , яка регулюється тиском повітря в камері катапульти 8 у діапазоні $P = (7 \dots 8)$ атм. При цьому при тому самому робочому тиску $P = 7$ атм початкова швидкість моделі через розгін зі штоком коливається у діапазоні від 8 м/с до 12 м/с, а в безштоковому варіанті з пижом - у діапазоні від 18 м/с до 24 м/с.

Відеокамера 16 встановлюється на рівні вільної поверхні води навпроти точки занурення моделі 1 у воду неподалік від початку лотка 14. Відстань до фасадного скла лотка 14 від камери 16 складає 1685 мм. За лотком шириною 34 см встановлюється світлова панель 15 на всю бокову площу лотка на відстані 12 мм за заднім склом, а на лоток 14, на відстані 11 см від тильного скла, кріпиться масштабна сітка з клітинками 10 на 10 см.

2.2. Порядок проведення експерименту

Перед експериментом наповнюється вода 12 у лотку 14 до максимального рівня 36 см, який забезпечує верхнє положення перепускної заслінки у кінці каналу. Повітря до накопичувача тиску 8 подається із підвищеним тиском від робочого 7 атм компресором 17 через проміжний ресивер 9 і становить 8 атм. Оператор регулює-знижує тиск у накопичувачі 8 до робочого краном 5 за допомогою інформації з манометра 6.

Модель розганяється під тиском повітря, яке випускає оператор краном 5 з накопичувача 8 до ствола катапульти 10 зі штоком 2 з наявними на ньому кільцями, що його центрують та ущільнюють у стволі 10. Схід моделі 1 зі штоку 2 відбувається завдяки ковзаючій посадці моделі 1 на шток катапульти, що дозволяє моделі здійснювати тільки повздовжній рух-схід в напрямку ходу штоку під час гальмування. У випадку Рис. 2б

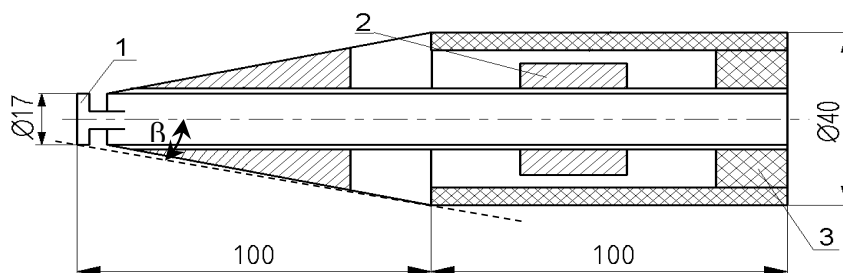


Рис. 3. Ескіз випробуваної моделі

шток відсутній і модель сходить зі стволу 10 самостійно. В цьому випадку використовується пластмасовий пиж 19 діаметром 42.5 мм, який допомагає ущільнити проміжок між моделлю і стволом, а відсікач повітря 20 зменшує вплив супутнього струменя повітря зі стволу на модель та вільну поверхню води.

Синхронно з початком розгону штока або самої моделі з пижом запускається відеозйомка камерою 16, яка триває 2 с. Звільнена модель фіксується камерою у контрольному освітленні разом з інформаційною табличкою 11. Модель проходить повітряну дистанцію, занурюється у воду (або відскакує від води) і у кінці лотка або на дні відбивається або гальмується гумовим уловлювачем 13.

2.3. Модель

Модель представляє собою тіло обертання з дисковим кавітатором і можливістю варіювання діаметра кавітатора D_n та положення центра мас x_c . На Рис. 3 представлено схему моделі, яка використовувалась в основних серіях випробувань.

На схемі позначено: 1 – знімний дисковий кавітатор; 2 – пересувний вантаж; 3 – заглушка; кут конусності носової частини $\beta = 6.5^\circ$. Конструкція моделі – складова (латунь, дюраль, пластик). В середині модель має порожню трубку діаметром 10 мм для насаджування на шток катапульти. Знімний кавітатор 1 і задня заглушка 3 посаджені на різьбленні.

На даному етапі роботи в випробуваннях використовувався кавітатор 1 діаметром $D_n = 17$ мм, який забезпечував рух моделі у воді в суперкавітаційному режимі. Маса моделі склала $m = 0.3$ кг, зміна положення центру мас моделі здійснювалося шляхом переміщення внутрішнього латунного вантажу 2, положення якого можна фіксувати за допомогою пластмасових вставок. При крайніх передньому та задньому положеннях вантажу 2 отримано відповідно значення $x_c = 116$ мм і $x_c = 132$ мм.

2.4. Методика обробки кінограм

Методика обчислення розмірів суперкаверни, миттєвої швидкості руху моделі $V(t)$, зміни її кута тангажу $\psi(t)$ вздовж траєкторії передбачає обробку відео знімків покадрової реєстрації швидкісною відеокамерою на частоті 1000 кадрів за секунду. Треба брати до уваги, що під час руху моделі вздовж траєкторії під водою зображення потерпає від спотворень, викликаних ефектом заломлення світлових променів на межах вода–скло та скло–повітря на шляху від моделі до відеокамери.

Для врахування оптичних спотворень зображень при підводних відео-реєстраціях

проводять попередньо статичну реєстрацію мірних еталонів. Основними еталонами є розмір моделі та розмір клітинки масштабної сітки. Завдяки ним був організований перерахунок розмірів пікселів та координат у координатах роздільної здатності фотографії.

На повітряній ділянці траєкторії оцінюється початкові швидкість моделі V_0 , кути ψ і γ , кутова швидкість ω_z та точка входу моделі воду. Швидкість оцінюється шляхом оцінки часу проходження кормою моделі початкового положення носика. За наявної умови швидкості зйомки 1000 кадрів за секунду кожен кадр приймається за зміну у часі в 1 мс. На відміну від швидкості шлях та час на графіках відкладався у відповідності до оптичного положення моделі на кадрі проти сітки з корекцією довжини на кут руху. Параметри входу знаходилися наступним чином: для оцінки кутів приймаються до уваги пара кадрів – кадр у момент торкання та за декілька кадрів до моменту торкання моделлю поверхні. За різницею у координатах носика та корми на кадрах оцінювалося положення центру мас, а за різницею у часі – її швидкість V . По цих двох точках на парі кадрів оцінюється кут руху центру мас γ . По кадру у момент входу оцінюється кут тангажу моделі ψ . За різницею кутів положення середніх ліній моделі на двох кадрах оцінювалася кутова швидкість її обертання ω_z .

3. РЕЗУЛЬТАТИ ВИПРОБУВАНЬ

Проведені випробування показали, що на цій установці з ряду причин важко витримувати значення потрібних повторюваних параметрів при вході моделі у воду – кут входу γ , кут тангажу моделі ψ та кутову швидкість моделі відносно центру мас ω_z . У той же час виявилося, що подальший рух моделі залежить від цих параметрів і положення центру мас x_c . В результаті при тому самому куті нахилу ствола катапульти α_c і тиску в накопичувачі катапульти P були отримані різні типи динаміки моделі при вході і проникненні моделі у воду. При цьому всі початкові параметри входу моделі у воду визначались апостеріорі шляхом обробки знятих кінограм.

На даному етапі роботи був проведений якісний аналіз процесів, що відбуваються. В результаті виділено чотири характерні типи динамічної поведінки моделей залежно від початкових умов:

- 1) проникнення моделі у воду вздовж прямолінійної або криволінійної траєкторії в режимі суперкавітації (див. Рис. 4а);
- 2) підводний рикошет (відскок);
- 3) підводне перекидання моделі;
- 4) поверхневий рикошет.

Встановлено, що якщо модель рухається прямолінійно, то після досягнення моделлю дна каналу каверна продовжує розвиватися згідно з принципом незалежності розширення перерізів каверни Г. В. Логвиновича [13], зокрема, відбувається її глибинне змикання (див. Рис. 4б)

При поверхневому рикошеті модель спочатку торкається поверхні води не кромкою кавітатора, а ділянкою корпусу. Поверхневий рикошет даної моделі від поверхні води

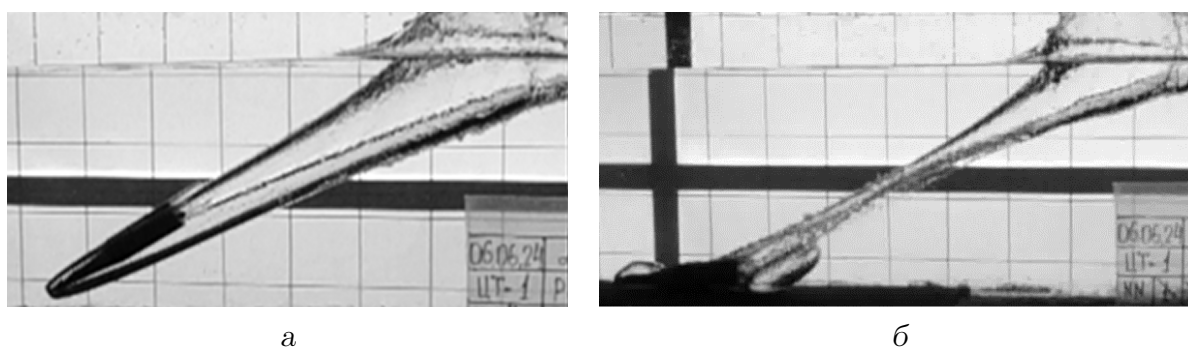


Рис. 4. Проникнення моделі у воду під малим кутом до вільної поверхні:
а — прямолінійний рух моделі; б — глибинне змикання каверни

Табл. 1. Початкові параметри при вході моделі у воду

№	x_c , мм	V_0 , м/с	γ , град	ψ , град	ω_z , град/с	Результат
C0018	116	9.8	7.75	8.73	150	прямолінійний рух
C0024	116	18.6	6.60	8.50	291	прямолінійний рух
C0025	116	21.0	6.83	5.65	55	прямолінійний рух
C0028	116	10.2	8.84	9.20	248	підводний рикошет
C0029	132	22.4	4.79	11.00	192	підводне тперекидання
C0030	132	21.3	4.70	2.38	–79	поверхневий рикошет
C0032	132	20.4	4.68	11.55	218	підводне перекидання
C0033	132	15.8	5.24	12.80	254	підводне перекидання
C0035	132	20.3	4.80	2.80	–125	поверхневий рикошет

при даних параметрах входу спостерігався при кутах входу менше 5° та здебільшого у випадку заднього положення центру мас $x_c = 132$ мм.

При підводному перекиданні модель спочатку торкається поверхні води кромкою кавітатора і починає формуватися звичайна каверна. Однак завдяки отриманим при вході у воду збуренням кут атаки моделі α стає неприпустимо великим, при цьому суперкавітаційний режим обтікання моделі руйнується і опір руху різко зростає.

При підводному рикошеті (відскоку) спочатку також починає формуватися звичайна каверна. Однак завдяки отриманим при вході у воду збуренням траєкторія моделі у воді інтенсивно викривляється і модель швидко виходить з води. При цьому, як правило, глибинне змикання каверни не відбувається і каверна згодом трансформується на западину на вільній поверхні води.

У Табл. 1 наведено результати обробки кінограм серії експериментів з метою знаходження початкових параметрів руху моделі V_0 , γ , ψ , ω_z у точці входу у воду. В останній колонці таблиці наводиться тип динамічної поведінки моделі при взаємодії з вільною поверхнею і проникненні у воду, зафіксований у випробуванні з відповідними початковими параметрами.

З цієї таблиці видно, що для реалізації того чи іншого типу динаміки моделі, що проникає у воду, суттєвим є положення центру мас моделі. Прямолінійний рух суперкавітуючої моделі спостерігався виключно при передньому положенні центру мас $x_c = 116$

мм. При задньому розташуванні центру мас $x_c = 132$ мм спостерігалися поверхневий рикошет і підводне перекидання моделі.

На Рис. 5, Рис. 7 та Рис. 9 представлено приклади кадрів кінограм процесу входу та проникнення моделі у воду при різних початкових параметрах. На Рис. 6, Рис. 8 та Рис. 10 представлено відповідні графіки обробки даних відео-зйомки в залежності від часу. На графіках по осі абсцис відкладено час t у мс, по осі ординат відкладені пройдена дистанція S в дм, поточна швидкість V в м/с і поточний кут тангажу моделі ψ у градусах. Вертикальна штрих-пунктирна лінія позначає момент торкання моделлю води.

На Рис. 5 представлено кадри кінограми пуску зі штоковим варіантом катапульти. В цьому випадку спостерігаємо прямолінійний рух моделі без відхилень. Візуально модель не взаємодіє зі стінками каверни. Другий горбочок нижньої стінки каверни біля поверхні з'являється під час проникнення тіла циліндричною частиною, коли носова каверна ще не розповсюдилася до цієї частини корпусу.

На Рис. 7 показано кадри кінограми безштокового пуску. На початку руху модель має швидкість близько 16 м/с і кутову швидкість 254 град/с проти годинникової стрілки. У точці входу маємо суттєву різницю кута входу $\gamma = 5.2^\circ$ та кута тангажу моделі $\psi = 12.8^\circ$. Як тільки модель достатньо занурюється у воду, її уповільнення прискорюється, а бічні сили, що діють на носову частину, і момент відносно центру мас моделі різко зростають. Після 60 мс спостереження модель починає підводне перекидання.

На Рис. 9 представлено кадри кінограми безштокового пуску моделі, в якому модель розігналася до 20.3 м/с. Кут входу у воду склав $\gamma = 5.2^\circ$, а початковий кут тангажу моделі – $\psi = 2.8^\circ$. Такі початкові умови призвели до того, що модель торкається поверхні води не кромкою кавітатора, а ділянкою корпусу, що утворило бічні відхиляючі силу и момент. При цьому взаємодія води з кавітатором почалася на 11 мс пізніше і протягом усього часу взаємодії занурення кавітатора сягало (40...50)%. В результаті стався поверхневий рикошет моделі.

4. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Для розрахунку та комп'ютерного моделювання динаміки моделей, що проникають у воду під довільними кутами до вільної поверхні, ми використовуємо апроксимаційну математичну модель, засновану на принципі незалежності розширення перерізів нестационарних суперкаверн Г. В. Логвиновича [13]. Для цього в розроблену раніше методику розрахунку [14,15] були додані співвідношення для розрахунку гідродинамічних сил при прямому та похилому вході дискового кавітатора у воду, алгоритм апроксимації форми каверни при похилому проникненні моделі у воду та співвідношення для урахування впливу вільної поверхні на форму нестационарної суперкаверни.

4.1. Розрахунок гідродинамічних сил при прямому та похилому вході дискового кавітатора у воду

Вважатимемо, що модель з дисковим кавітатором входить у воду з атмосфери через вільну поверхню води зі швидкістю V_0 під кутом до горизонту $0^\circ < \gamma \leq 90^\circ$ (значення $\gamma = 90^\circ$ відповідає прямому удару). У момент торкання води модель може мати кут атаки α та кутову швидкість відносно центру мас ω_z (див. Рис. 1). Дисковий кавітатор

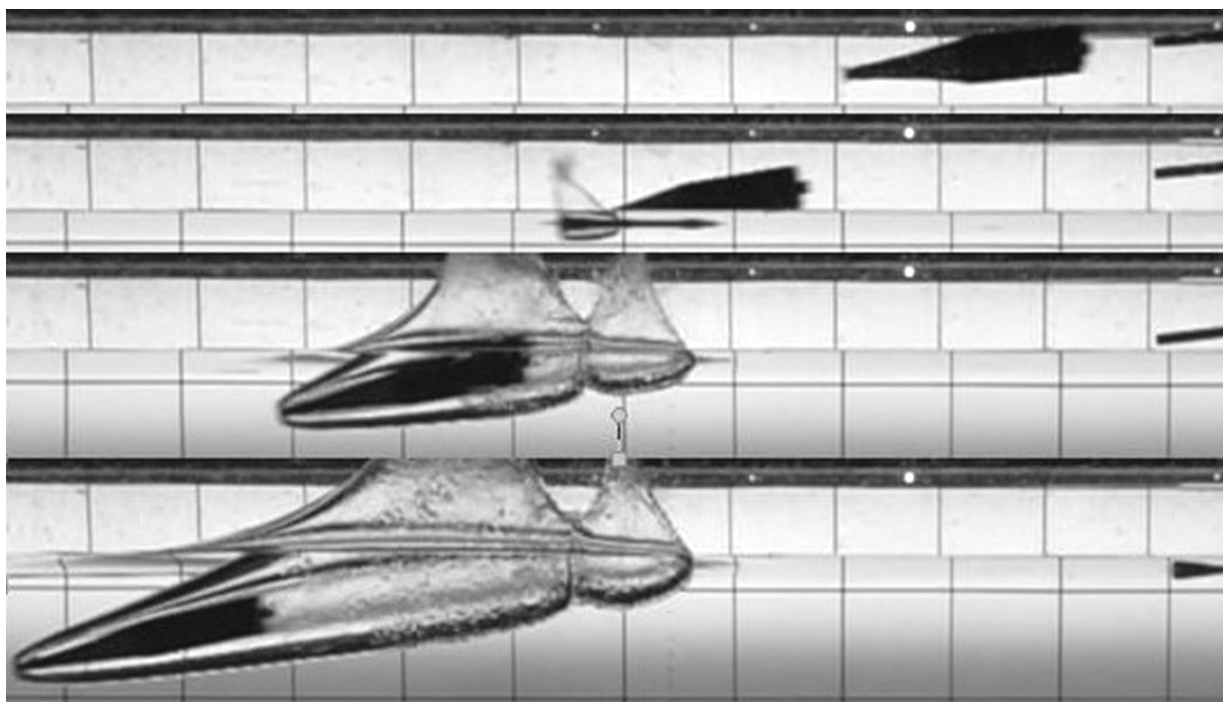


Рис. 5. Випробування C0018: $\alpha_c < 5^\circ$, $P = 7$ атм, $x_c = 116$ мм.
Кожний 22-ий кадр. Прямолінійний рух моделі

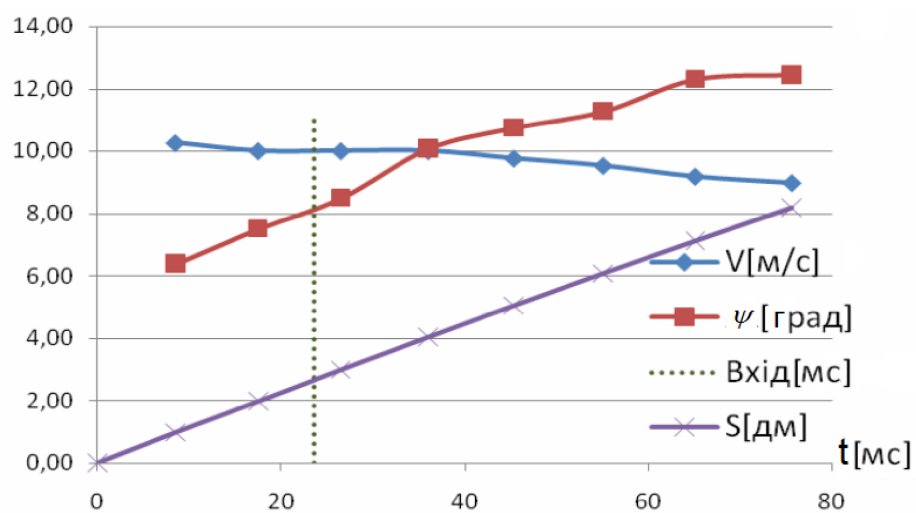


Рис. 6. Випробування C0018. Зміна параметрів руху

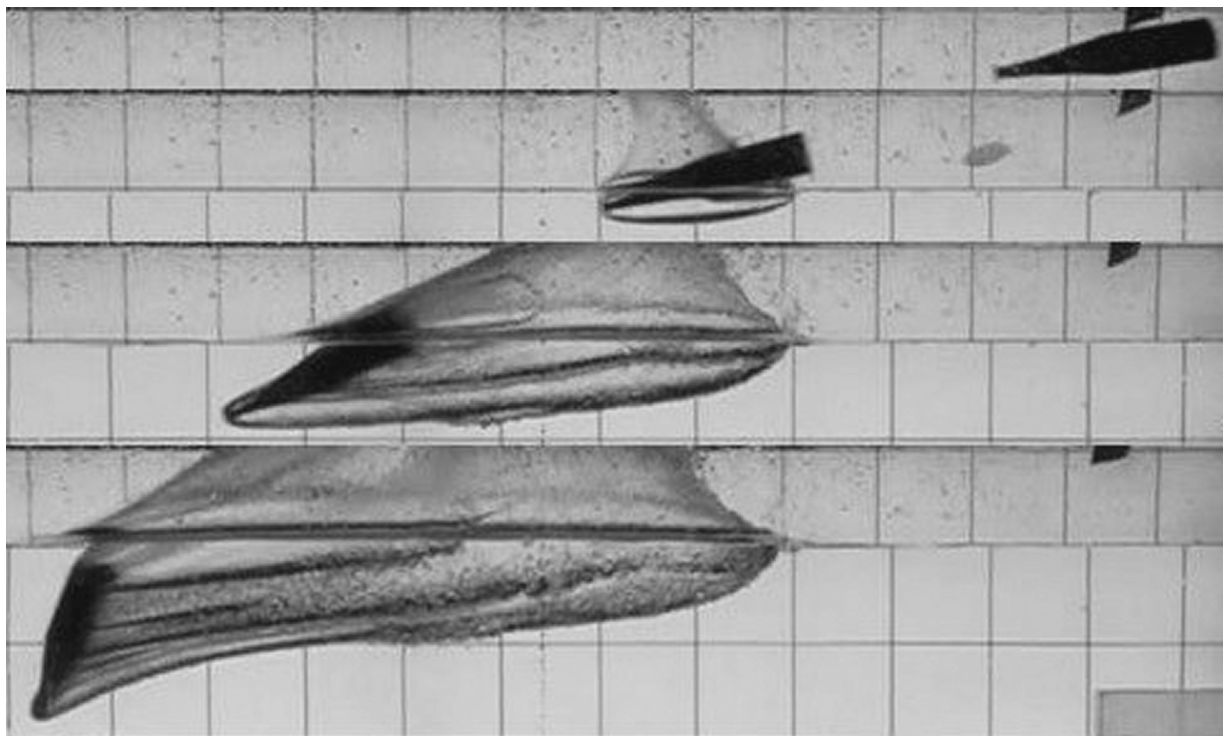


Рис. 7. Випробування C0033: $\alpha_c = 5^\circ$, $P = 7$ атм, $x_c = 132$ мм.
Кожний 27-ий кадр. Підводне перекидання моделі

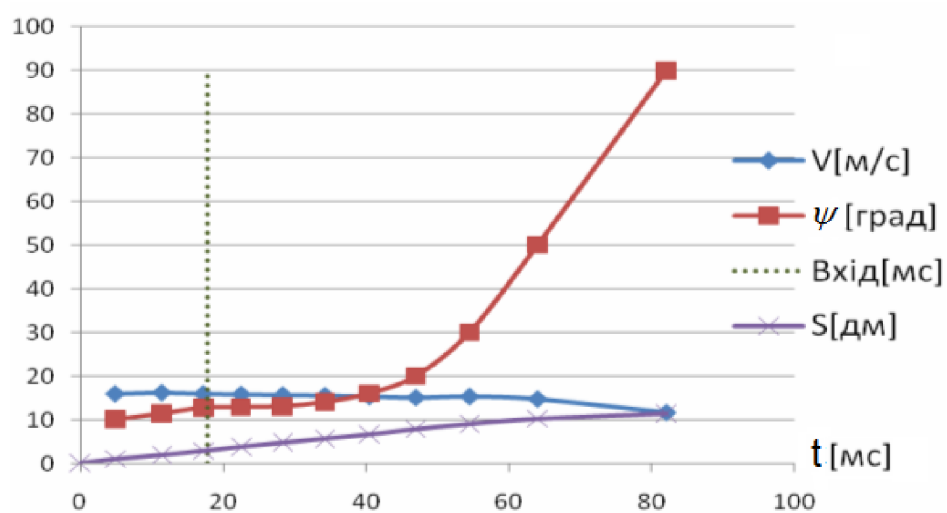


Рис. 8. Випробування C0033. Зміна параметрів руху

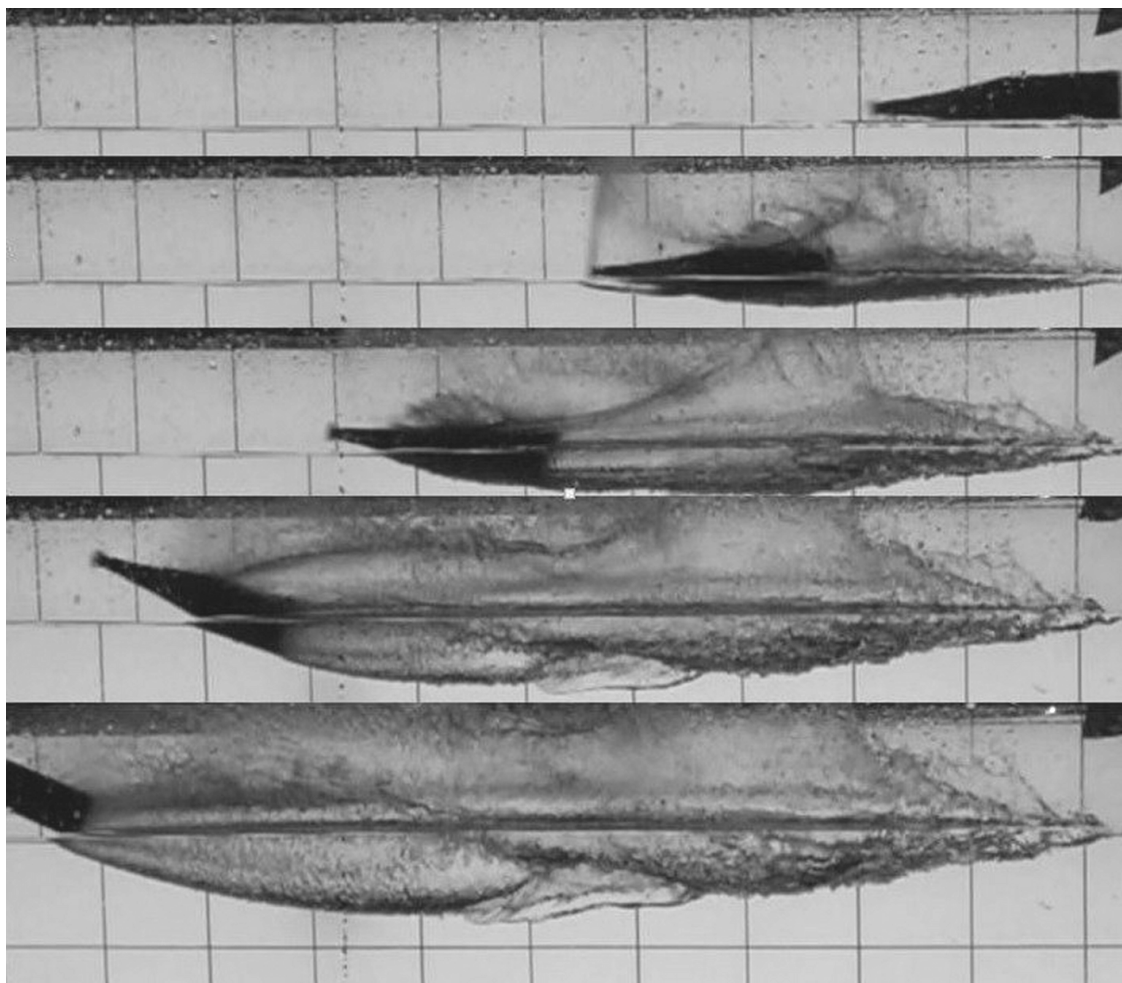


Рис. 9. Випробування S0035: $\alpha_c = 4.3^\circ$, $P = 7$ атм, $x_c = 132$ мм.
Кожний 12-ий кадр. Поверхневий рикошет

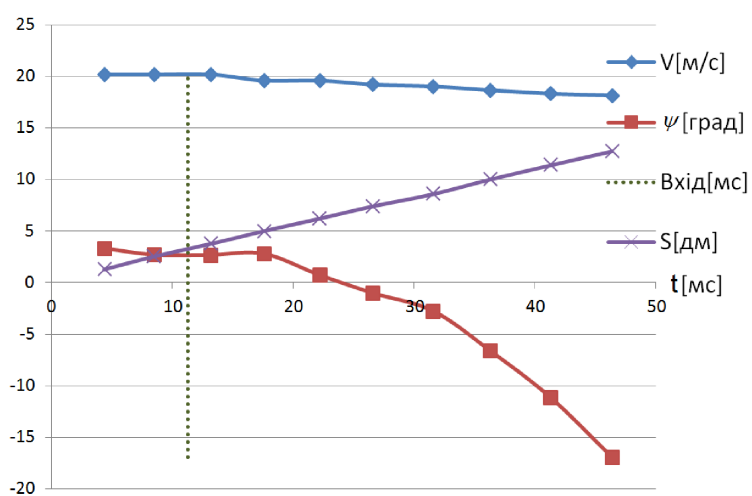


Рис. 10. Випробування S0035. Зміна параметрів руху

може бути нахилений на кут δ_z до площини перпендикулярної до осі моделі.

Як відомо, при прямому плоскому ударі диска по воді суттєво проявляється стисливість води. Тому у випадку дискових кавітаторів для розрахунку максимально можливих навантажень використовується апроксимація експериментальних даних по входу диска в стисливу рідину [16]:

$$c_x^{\max} = 1.87 + \frac{2.13}{M}, \quad (1)$$

де $c_x^{\max}$ – коефіцієнт сили; $M = V_0/a$ – число Маха, $a \approx 1460$ м/с – швидкість звуку у воді. Максимальне осьове навантаження на модель обчислюється за формулою:

$$F_{\max} = \frac{\rho V_0^2}{2} \frac{\pi D_n^2}{4} c_x^{\max}. \quad (2)$$

Для ізольованого диска, що входить у воду зі сталою швидкістю V_0 під кутом γ з вільною поверхнею, площа якого нахилена на кут $\mu = \delta_z + \alpha$ до вектора швидкості, отримано напівемпіричну залежність для коефіцієнта максимальної нормальної сили [17]:

$$c_n^{\max} = 0.8 \cos \mu \left[1 + \frac{\sin \gamma}{\cos(\gamma - \mu)} \right], \quad \gamma = (30 \dots 85)^\circ, \quad |\mu| \leq 20^\circ. \quad (3)$$

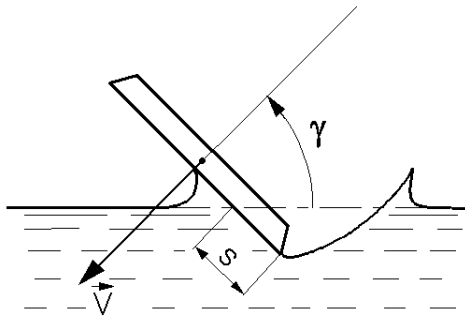


Рис. 11. Схема похилого входу диска у воду

З експериментів відомо, що в міру занурення диска коефіцієнт c_n лінійно зростає від нуля і досягає максимуму (3) при $s \approx 0.65$, де s – безрозмірне занурення диска (див. Рис. 11):

$$s = \frac{x \operatorname{tg} \gamma}{D_n}. \quad (4)$$

Після досягнення максимуму коефіцієнт c_n практично лінійно зменшується до $s \approx 1.4$, а при $s > 2$ для всіх γ залишається сталим, рівним коефіцієнту кавітаційного опору диска $c_{x0} = 0.82$. Для розрахунку у всьому діапазоні координати s запропоновано наступну апроксимаційну формулу:

$$c_n(s) = \begin{cases} \frac{c_n^{\max}}{0.65} s, & 0 \leq s \leq 0.65, \\ \frac{c_{x0} - c_n^{\max}}{0.75} s + \frac{1.4c_n^{\max} - 0.65c_{x0}}{0.75}, & 0.65 < s \leq 1.4, \\ c_{x0}, & s > 1.4. \end{cases} \quad (5)$$

Коефіцієнти проекцій нормальної сили на осі зв'язаної системи координат та моменту відносно центру мас моделі розраховуються для кожного за формулами:

$$c_{nx} = c_n \cos(\delta_z + \alpha) \cos \delta_z, \quad c_{ny} = -c_n \cos(\delta_z + \alpha) \sin \delta_z, \quad c_{nm} = c_{ny} x_c / L. \quad (6)$$

В окремому випадку прямого удару дискового кавітатора по вільній поверхні води $\gamma + \delta_z + \alpha = 90^\circ$ максимальний коефіцієнт сили (1) досягається при $t = 0$. У цьому випадку запропоновано наступну апроксимаційну формулу:

$$c_x(\bar{x}) = \begin{cases} c_x^{\max} + \frac{c_{x0} - c_x^{\max}}{\bar{x}_1} \bar{x}, & 0 \leq \bar{x} \leq \bar{x}_1, \\ c_{x0}, & \bar{x} > \bar{x}_1, \end{cases} \quad (7)$$

де $\bar{x} = x/D_n$, $\bar{x}_1$ – дистанція, на якій коефіцієнт сили зменшується від $c_x^{\max}$ до c_{x0} .

4.2. Формування суперкаверни при проникненні моделі у воду

У процесі проникнення у воду за моделлю розвивається каверна, заповнена атмосферним повітрям. У певний момент часу відбувається глибинне змикання каверни і подальший рух моделі відбувається в режимі суперкавітації. При цьому число кавітації для кожного перерізу каверни змінюється внаслідок зміни глибини занурення H , тиску в каверні p_c і швидкості руху V :

$$\sigma(s, t) = \frac{p_{\text{atm}} + \rho g H(s, t) - p_c(t)}{\rho V^2(t)/2}, \quad (8)$$

де p_{atm} – атмосферний тиск; s – поздовжня координата вздовж осі каверни. Тиск в каверні $p_c(t)$ змінюється внаслідок зміни об'єму каверни та втрати газу з каверни, він може також регулюватися шляхом піддуву газу в каверну.

Точна форма каверни, що утворюється при похилому вході моделі у воду, не може бути розрахована у межах прийнятої математичної моделі. Такі явища, як утворення сплеску та поверхневе змикання каверни, вдається змоделювати лише чисельними методами CFD. Тому з метою відповідності експериментальним даним ми запропонували наступний алгоритм апроксимації форми каверни, що формується (див. Рис. 12):

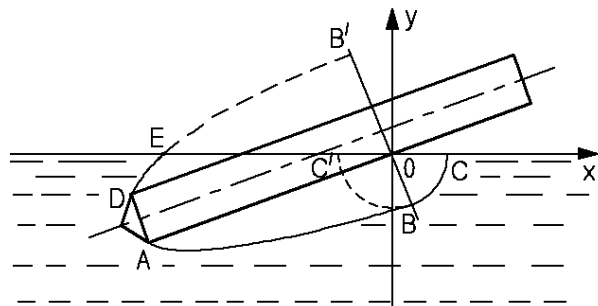


Рис. 12. Схема апроксимації форми каверни при похилому проникненні моделі у воду

- 1) від кавітатора до перерізу BB' , що проходить через точку початкового торкання води O нижньою кромкою кавітатора A , форма каверни розраховується як при русі моделі в безмежній рідині. При цьому верхній контур каверни будується від верхньої кромки кавітатора D до перетину з поверхнею води E з урахуванням впливу вільної поверхні;
- 2) як показано в роботі [18], при високошвидкісному ударі по поверхні води формується порожнина, яка розширюється і прагне набути сферичної форми. Тому нижній контур каверни сполучається в точці B з контуром напівкруглої порожнини CBC' на поверхні води. Центр порожнини збігається з точкою O , а радіус дорівнює $R_c - R_n$, де R_c – радіус каверни в перерізі BB' ; R_n – радіус кавітатора.

4.3. Урахування впливу вільної поверхні води

Особливістю каверн у випадку малих кутів входу і проникнення в воду є несиметричність їх верхньої та нижньої меж відносно осі моделі. Якісно характер впливу вільної поверхні на форму каверни можна пояснити тим, що для верхньої та нижньої меж каверни буде різним число кавітації, обчислене за формулою (8). В нашій роботі [8] було встановлено, що радіус верхнього контуру суперкаверни значно перевищує радіус нижнього контуру і були запропоновані апроксимаційні формули для максимальних радіусів верхньої та нижньої меж контурів каверни (відповідно $R_c^{(u)}$ і $R_c^{(l)}$) для одного конкретного випадку (кут входу $\gamma = 10.1^\circ$ і швидкість входу $V_0 = 13.9$ м/с):

$$\bar{R}_c^{(u)} = 1.0 + \frac{10\bar{x}_m}{\bar{x}_m + 15}, \quad \bar{R}_c^{(l)} = 1.0 + \frac{3.8\bar{x}_m}{\bar{x}_m + 8}, \quad (9)$$

де $R_c^{(u)}$ і $R_c^{(l)}$ – найбільші радіуси відповідно верхньої та нижньої меж контурів каверни; $\bar{x}_m = x_m/R_n$; $\bar{R}_c = R_c/R_n$; $x_m^{(u)}$, $x_m^{(l)}$ – відстані від кавітатора до поперечних перерізів найбільшого радіуса відповідно верхньої та нижньої меж каверни.

Такий висновок про характер впливу вільної поверхні на форму суперкаверни якісно підтверджується також чисельними розрахунками методами CFD і експериментальними дослідженнями усталеного руху моделі на малих відстанях від вільної поверхні [19, 20].

Результати теоретичного дослідження впливу вільної поверхні води на форму стаціонарної каверни за диском містяться у роботах [20–22]. В них показано, що вплив вільної поверхні води за однакового значення числа кавітації σ полягає у певному зменшенні довжини каверни L_c і у збільшенні радіусів перерізів каверни $R(x)$. У випадку формування каверни при проникненні моделі у воду під малими кутами до горизонту є більш істотним другий фактор.

У роботі [22] методом особливостей побудовано розв'язок для «чистої» осесиметричної каверни поблизу вільної поверхні:

$$y_c = \frac{\sigma L_c}{4} \left(\sqrt{1 - \bar{x}^2} + \frac{1 - \bar{x}^2}{8\bar{H}} \right), \quad -1 \leq \bar{x} \leq 1, \quad (10)$$

де σ – число кавітації; $\bar{x} = 2x/L_c$; $\bar{H} = H/L_c$. Однак досвід розрахунків і порівняння з експериментальними даними в роботі [22] показали, що при усталеному обтіканні теоретична формула (11) дає завищені значення радіусів каверни поблизу вільної поверхні. Для їх зменшення ми пропонуємо ввести у знаменнику другого доданку коригуючий множник $K_s > 1$. Значення коригуючого множника K_s слід вибирати з умови найкращого узгодження розрахункових і експериментальних даних.

Переходячи у формулі (10) до розмірних змінних, роблячи заміну змінної $x = x' - L_c/2$, запишемо вираз для ординати верхньої межі реальної каверни у вигляді (штрихи опущені):

$$y_{c2}(x) = \frac{D_c}{L_c} \left(\sqrt{x(L_c - x)} + \frac{x(L_c - x)}{4HK_s} \right), \quad 0 \leq x \leq L_c. \quad (11)$$

Звідси отримуємо наближену формулу для деформації осі стаціонарної каверни, спричиненої впливом вільної поверхні:

$$h_{sy}(x) = \frac{\sqrt{\sigma}x(L_c - x)}{4AK_s}, \quad 0 \leq x \leq L_c. \quad (12)$$

Для наближеного урахування впливу вільної поверхні води на форму стаціонарних та нестаціонарних каверн скористаємося формулою (12) та принципом незалежності розширення перерізів каверни [13]. При цьому в рамках прийнятої математичної моделі вважатимемо, ґрунтуючись на експериментальних даних, що форма нижньої межі каверни не змінюється порівняно з випадком безмежної рідини, перерізи каверни залишаються круговими, а вісь каверни викривляється (аналогічно викривленню осі каверни при врахуванні впливу плавучості Архімеда [14]).

Ординати нижнього (індекс 1) та верхнього (індекс 2) контурів стаціонарної каверни поблизу вільної поверхні визначаються співвідношеннями:

$$y_{c1}(x) = -R(x) + h_{ny}(x) + h_{gy}(x), \quad (13)$$

$$y_{c2}(x) = R(x) + h_s(x) + h_{ny}(x) + h_{gy}(x) + h_{sy}(x), \quad (14)$$

де R – радіус поточного перерізу осесиметричної каверни; $h_{ny}(x)$ – зміщення, обумовлене наявністю підйомної сили на нахиленому кавітаторі [14]; $h_{gy}(x)$ – зміщення, обумовлене дією сили плавучості Архімеда [14]; $h_{sy}(x)$ – зміщення, обумовлене впливом вільної поверхні води (12).

На Рис. 13 показана форма верхньої та нижньої меж стаціонарної каверни за диском, обчислена при сталих значеннях $D_n = 17$ мм, $V = 20$ м/с, $\sigma = 0.05$, $K_s = 1.5$ для ряду значень глибини H . При цьому $L_c = 0.667$ м, $Fr = V/\sqrt{gD_n} = 48.99$. На рисунку позначено $\bar{x} = x/L_c$, $\bar{y} = y/D_n$, $\bar{H} = H/D_n$.

У випадку нестаціонарного обтікання моделі у кожний момент часу ординати нижнього та верхнього контурів каверни в нерухомій системі координат відповідно до принципу незалежності розширення перерізів каверни [13] визначаються співвідношеннями:

$$y_{c1}(\tau, t) = -R(\tau, t) + y_n(\tau) + h_{ny}(\tau, t) + h_{gy}(\tau, t), \quad (15)$$

$$y_{c2}(\tau, t) = R(\tau, t) + y_n(\tau) + h_{ny}(\tau, t) + h_{gy}(\tau, t) + h_{sy}(\tau, t), \quad (16)$$

де $\tau \leq t$ – момент проходження кавітатора через поточний переріз каверни; y_n – ордината центру кавітатора;

$$h_{sy}(\tau, t) = \frac{\sqrt{\sigma(\tau)}x(\tau)(L_c(t) - x(\tau))}{4AH(\tau)K_s}. \quad (17)$$

Зауваження 1. Як показує експеримент, при дуже малих відстанях суперкавітуючої моделі від вільної поверхні води можливий прорив атмосферного повітря в каверну (див., наприклад, [19, 20]). У цій методиці розрахунку цей ефект не розглядається.

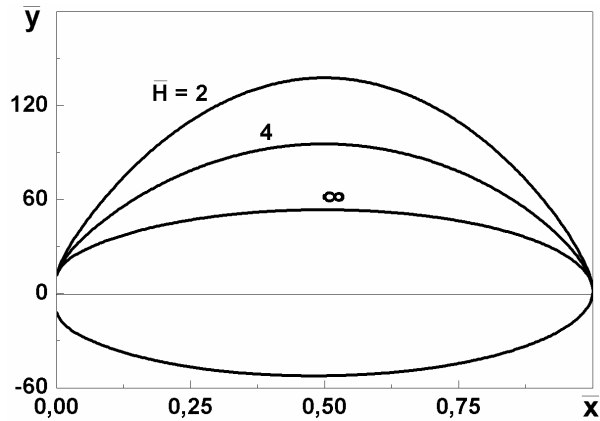


Рис. 13. Форма меж стаціонарної каверни поблизу вільної поверхні води, $K_s = 1.5$

Зауваження 2. Очевидно, що формули (12), (17) не можна застосовувати при $H \rightarrow 0$. Тому при розрахунках вводиться обмеження: при $H \geq 2D_n$ зміщення $h_{sy}(H, x)$ обчислюється за формулами (12), (17), при $H < 2D_n$ покладається $h_{sy}(H, x) = h_{sy}(2D_n, x)$.

5. КОМП'ЮТЕРНІ ПРОГРАМИ DIVE

Описана методика розрахунку гідродинамічних параметрів при похилому вході та проникненні моделей у воду та русі суперкавітуючих моделей у воді реалізована у вигляді демонстраційних програм DIVE різних версій. Код програм написаний алгоритмічною мовою Fortran.

Програма DIVE_16.2 призначена для розрахунку повного циклу руху суперкавітуючих моделей, що включає високошвидкісний вхід моделі у воду та формування каверни, керований рух суперкавітуючої моделі у воді і вихід суперкавітуючої моделі з води. На ділянці траєкторії після глибинного змикання передбачена можливість вентиляції каверни зі сталим або змінним піддувом. У програмі розраховується вхід у воду під довільним кутом до горизонту та керований рух суперкавітуючих моделей з дисковим кавітатором з урахуванням заданих змін тиску у воді $p_w(t)$ та витрати повітря на піддув каверни $Q_{in}(t)$, а також обтікання нерухомих суперкавітуючих моделей потоком заданої змінної швидкості $V(t)$ (bench-test mode).

Пункт меню *Effects* включає функції, що служать для задавання параметрів збурення течії трьох типів:

- 1) зміни швидкості набігаючого потоку $V(t)$ (bench-test mode);
- 2) збурення зовнішнього тиску у воді $p_w(t)$;
- 3) зміна витрати піддуву газу в каверну $Q_{in}(t)$.

Усього меню програми DIVE_16.2 разом із випадаючими підменю містить 76 різних функцій.

Програма DIVE_52 призначена для порівняння результатів розрахунків за даною методикою з експериментальними даними, які отримані та передбачається отримати у майбутньому у Лабораторії сучасної гідродинаміки (функції *Water Entry* і *Water Exit*) та на буксирувальному стенді (функція *Towing Tank*) Інституту гідромеханіки НАН України. У головному меню програми DIVE_52 відсутні пункти *Nose Control* та *Fin Control*, а пункт *Dynamics* перейменований на *Testing*. Пункт меню *Effects* додатково до перерахованих вище включає функцію, що служить для задавання зміни глибини занурення моделі $H(t)$ під час виконання функції *Testing / Towing Tank*. Усього меню програми DIVE_52 разом з випадаючими підменю містить 50 різних функцій.

При виконанні функцій *Testing / Water Entry* та *Testing / Water Exit* програми DIVE_52 розглядаються моделі з дисковим кавітатором. При виконанні функцій *Steady / ...* та *Testing / Towing Tank* модель може мати як дисковий, так і конусний кавітатор з кутом при вершині $30^\circ \leq \beta_n < 180^\circ$ [23].

При виконанні функції меню *Dynamics* і *Testing* програм DIVE користувач може спостерігати на екрані комп'ютера різноманітні процеси еволюції каверни при вході у воду, русі у воді та виході з води як у потоковій системі координат (як при зйомці

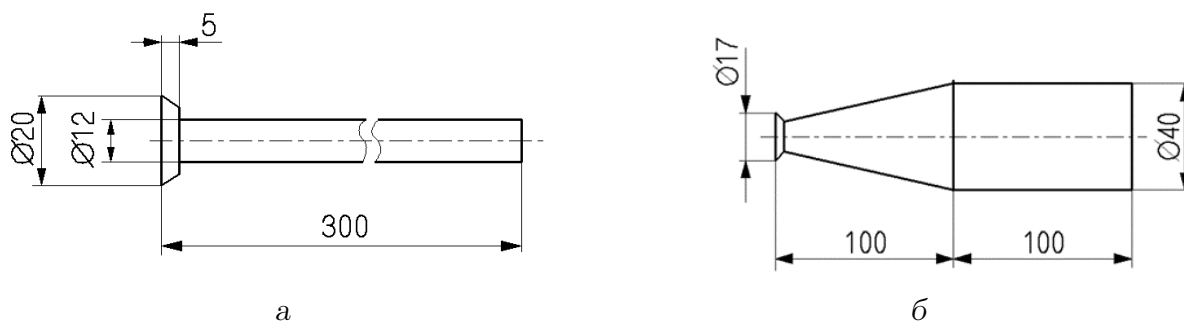


Рис. 14. Ескізи розрахункових моделей:

а — Модель 1; б — Модель 2

рухомою відеокамерою), так і у фіксованій системі координат (як при зйомці нерухомою відеокамерою).

Зауваження 3. В інтерфейсі функцій меню *Dynamics / ...* і *Testing / Idots* при вигляді збоку кути α , γ визначаються в лівій системі координат, тобто додатним вважається поворот за годинниковою стрілкою. Тому значення цих кутів, а також кутової швидкості моделі ω_z при задаванні початкових даних і на скріншотах нижче відображаються зі знаком мінус.

6. ПРИКЛАДИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ З ЕКСПЕРИМЕНТОМ

Нижче наведено приклади скріншотів, отриманих у процесі роботи програм DIVE. При цьому використовувалися дві розрахункові моделі (див. Рис. 14):

1. Модель 1 – інерційна модель, що є дисковим кавітатором, закріпленим на кінці довгого штока, як в експериментах роботи [8]. Основні параметри Моделі 1: довжина $L = 300$ мм, діаметр штока $D_b = 12$ мм, діаметр кавітатора $D_n = 20$ мм, маса $m = 0.26$ кг, положення центру мас $x_c = 150$ мм, момент інерції відносно центру мас $I_z = 2.1 \cdot 10^{-3}$ кг м².
2. Модель 2 – інерційна модель, що має ту саму форму і ті ж динамічні параметри, що в експериментах, описаних вище (див. вище Рис. 3). Основні параметри Моделі 2: довжина $L = 200$ мм, діаметр циліндричної частини $D_b = 40$ мм, діаметр кавітатора $D_n = 17$ мм, маса $m = 0.3$ кг, положення центру мас $x_c = 116$ мм або 132 мм. Для розподілу мас моделі як на Рис. 3 були отримані значення моменту інерції відносно центру мас відповідно $I_z = 9.7 \cdot 10^{-4}$ кг м² або $I_z = 1.35 \cdot 10^{-3}$ кг м².

6.1. Усталений рух суперкавітуючої Моделі 1 поблизу вільної поверхні води (порівняння з експериментом)

На Рис. 15 представлені експериментальна фотографія, отримана на буксирувальному стенді Інституту гідромеханіки НАН України [20], і скріншот, отриманий під час роботи функції *Steady / Cavity* програми DIVE_52 для тих самих значень параметрів: $\beta_n = 30^\circ$, $V = 10$ м/с, $H = 0.03$ м, $\sigma = 0.07$. Порівняння Рис. 15б з Рис. 15а показує якісну відповідність розрахунку та експерименту.

В експерименті верхня межа каверни є тонким шаром води, що утворює горб на вільній поверхні. При цьому каверна не руйнується і має форму, близьку до обчисленої за формулами (13), (14).

6.2. Оцінка ймовірності рикошету від поверхні води

Рикошет тіл від поверхні води спостерігається, як правило, при малих кутах входу та великих швидкостях входу. Експериментальному дослідженню явищ поверхневого та підводного рикошету присвячені роботи [1, 5–7]. Теоретичне та чисельне дослідження цих явищ досі пов'язане з великими труднощами (див. наприклад [9, 12]).

Як відомо з практики, дискові кавітатори з гострою кромкою мають властивість безрикошетного входу у воду при будь-яких кутах і будь-яких швидкостях входу. Тому природно припустити, що рикошет від поверхні води для моделі з дисковим кавітатором можна очікувати в тому випадку, якщо модель спочатку торкається поверхні води не кромкою кавітатора, а будь-якою ділянкою корпусу. Таким чином, у першому наближенні задача оцінки можливості рикошету моделі від поверхні води є чисто геометричною. Вона повністю визначається формою даної моделі та двома кутами – кутом входу моделі у воду γ та кутом атаки моделі α , і не залежить від динамічних параметрів – швидкості входу V_0 та кутової швидкості моделі відносно центру мас ω_z .

Функція меню *Dynamics / Dive Result* програми DIVE_16.2 дозволяє для моделі заданої форми автоматично розрахувати область можливого рикошету на площині параметрів (γ, α) . На Рис. 16 показано результати виконання функції *Dynamics / Dive Result* відповідно для Моделі 1 і Моделі 2. На діаграмах область можливого рикошету зафарбована червоним кольором.

Звідси можна бачити, зокрема, що у випадку незбуреного входу моделей у воду $\alpha = 0^\circ$ рикошет від поверхні води можливий для Моделі 2 при $\gamma \leq 7.0^\circ$, а для Моделі 1 неможливий ні за яких γ .

Зауважимо, що геометрична оцінка ймовірності рикошету моделі від поверхні води є "оцінкою зверху". Точніша оцінка і власне розрахунок руху моделі при рикошеті вимагає точного розрахунку нестационарних гідродинамічних сил і моментів при замиві корпусу моделі на початковій ділянці проникнення моделі у воду.

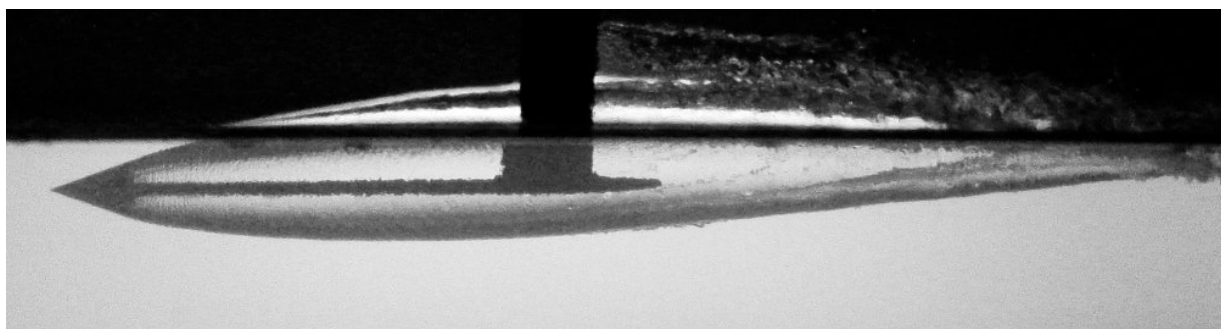
6.3. Вхід та проникнення у воду Моделі 1 (порівняння з експериментом)

У серії випробувань в Лабораторії сучасної гідродинаміки Інституту гідромеханіки НАН України [8] завдяки тому, що кавітатор був закріплений на кінці довгого штока, він рухався майже прямолінійно, тобто у цьому випадку було виключено вплив на форму каверни ефектів, пов'язаних із динамікою моделі.

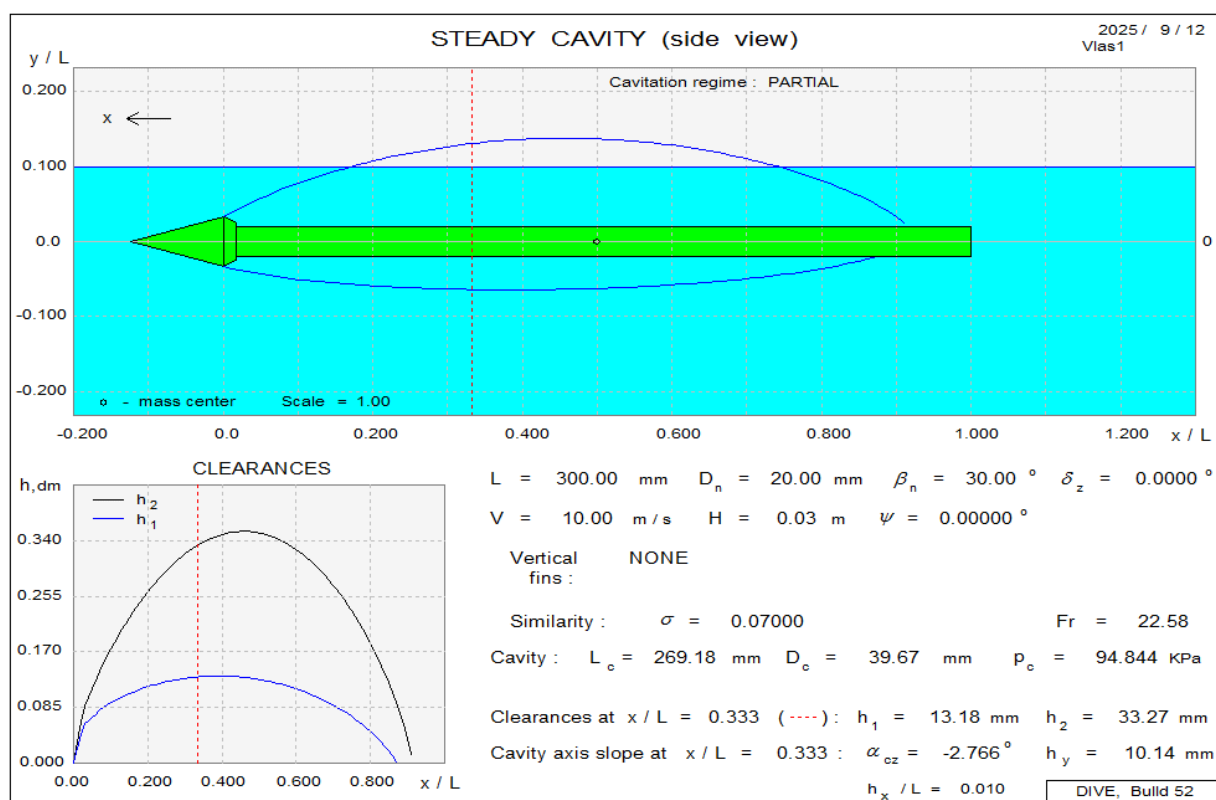
Для максимальних радіусів верхньої та нижньої меж каверни, що формується, запропоновано апроксимаційні формули (9) для $\gamma = -10.1^\circ$ і $V_0 = 13.9$ м/с.

На Рис. 17 представлено кадр №50 експериментальної кінограми (кадр №5 відповідає моменту торкання води) та скріншот, отриманий при роботі функції *Testing / Water Entry* програми DIVE_52 для Моделі 1 при $\beta_n = 180^\circ$ і тих же початкових значеннях параметрів в момент часу $t = (50 - 5) \times 0.001 = 0.045$ с.

Порівняння з експериментом показало, що вплив вільної поверхні на форму каверни, що формується при вході моделі у воду, дуже істотний. При цьому у початкові моменти

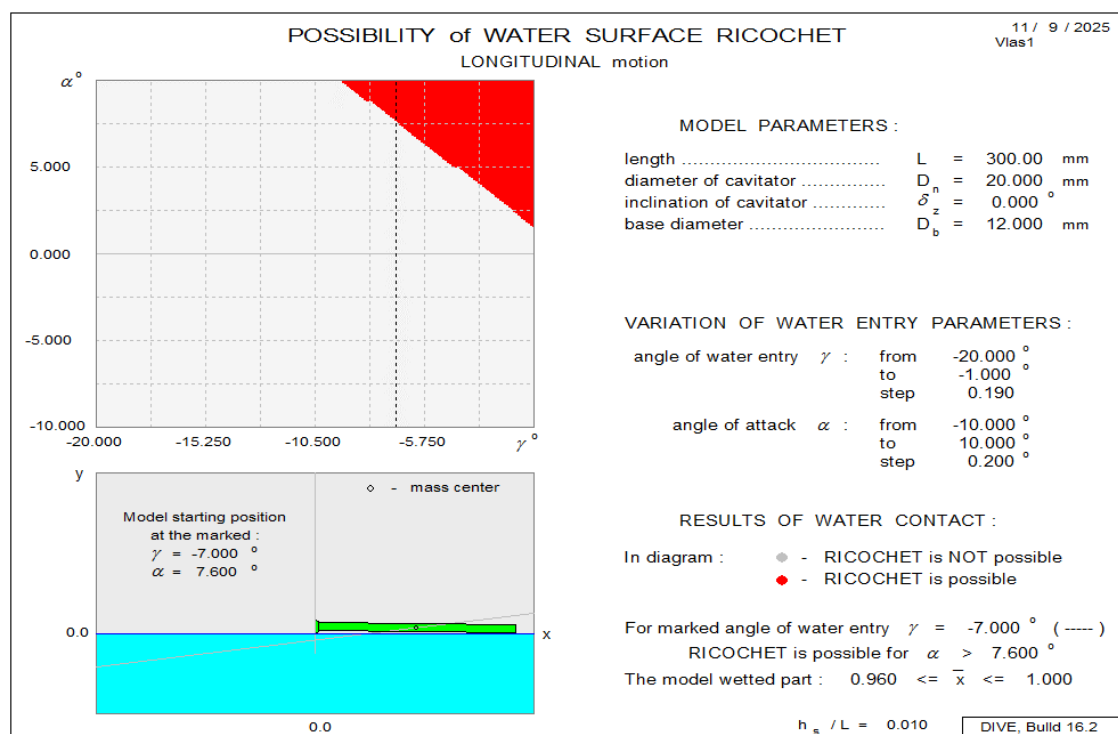


a

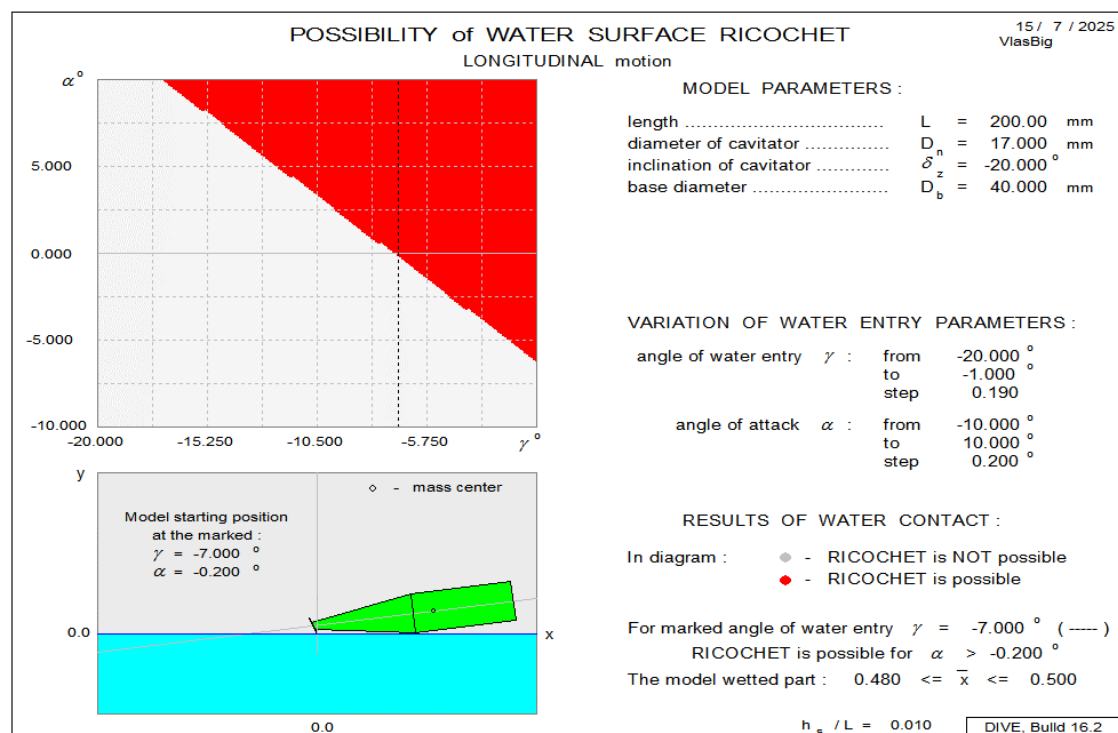


b

Рис. 15. Функція *Steady / Cavity* програми DIVE_52:
a — експеримент [20]; б — розрахунок, $K_s = 1.5$



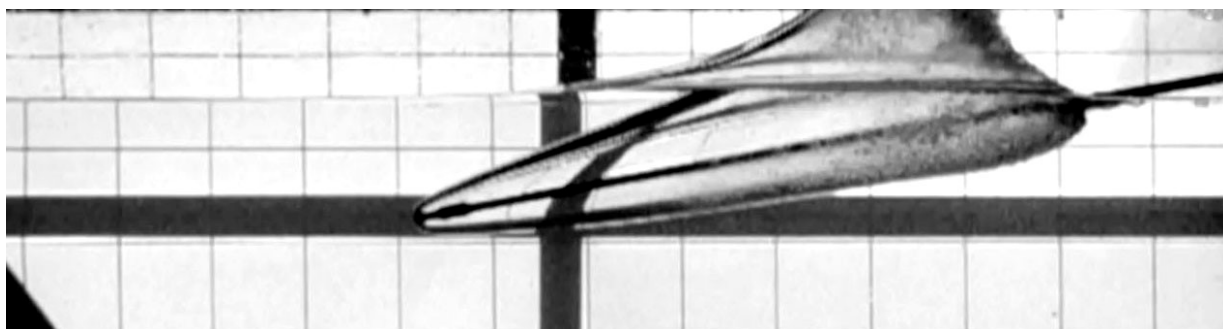
a



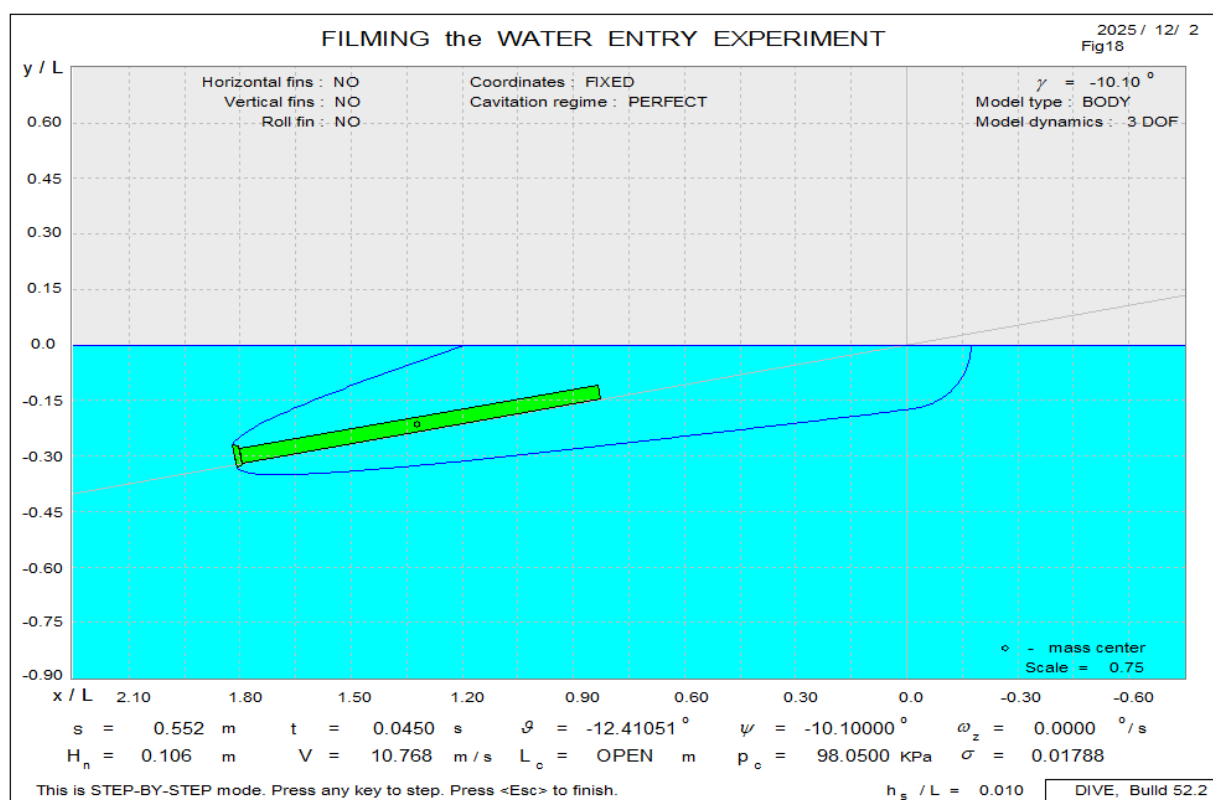
б

Рис. 16. Функція Dynamics / Dive Result програми DIVE_16.2

а — Модель 1; б — Модель 2



a



b

Рис. 17. Функція *Testing / Water Entry* програми DIVE_52:
a — експеримент, кадр №50; б — розрахунок, $t = 0.045 \text{ s}$

часу за будь-яких значеннях K_s розрахунок дає менш повну форму каверни, ніж експеримент. При не дуже малих проміжках часу урахування впливу вільної поверхні дає ближчу відповідність до експериментальних даних (9) при $K_s = (2 \dots 3)$.

6.4. Вхід та проникнення у воду Моделі 2 (порівняння з експериментом)

На Рис. 18 представлено скріншот процесу проникнення Моделі 2 у воду під час роботи функції *Testing / Water Entry* програми DIVE_52 при початкових значеннях параметрів $x_c = 116$ мм, $\gamma = -15^\circ$, $V_0 = 12$ м/с, $\alpha = -30$, $\omega_z = 100$ град/с в момент часу $t = 0.0805$ с, відповідний кадр кінореєстрації на Рис. 4а.

У цьому випадку, на відміну від Розділу 6.3, істотною є динамічна поведінка моделі і, як наслідок, викривлення траєкторії її руху. Порівняння розрахованої форми каверни з експериментальною фотографією на Рис. 4а дозволяє відзначити задовільну відповідність розрахунку та експерименту.

На Рис. 19 представлено графіки залежності основних параметрів руху: швидкості моделі $V(t)$, пройденої відстані $S(t)$ і кута тангажу моделі $\psi(t)$ від часу, розраховані при тих же початкових значеннях параметрів. Порівняння з експериментальними графіками на Рис. 6 і Рис. 8 дозволяє відзначити, що зміна швидкості моделі V і пройденої відстані S добре узгоджуються в розрахунку та експерименті незалежно від початкових даних. У той же час зміна кута тангажу моделі ψ сильно відрізняється залежно від початкових значень параметрів α і ω_z .

6.5. Глибинне змикання каверни (Модель 2, порівняння з експериментом)

Після входу моделі у воду формується каверна, що сполучається з атмосферою. У міру збільшення глибини занурення моделі зростає навколишній тиск у воді p_w , внаслідок чого в певний момент часу t_{dc} відбувається глибинне змикання каверни. Відразу після глибинного змикання довжина каверни L_c різко зменшується до величини, що відповідає поточному значенню числа кавітації. Подальший рух моделі відбувається у режимі суперкавітації, при цьому довжина каверни може підтримуватись сталою або змінюватись заданим чином шляхом вентиляції каверни.

На Рис. 20 представлено скріншот, отриманий при розрахунку процесу проникнення Моделі 2 у воду за допомогою функції *Dynamics / Dive 3D* програми DIVE_16.2. Початкові значення параметрів $x_c = 116$ мм, $K_s = 1.5$, $\gamma = -15^\circ$, $V_0 = 13$ м/с, $\alpha = -5^\circ$. На скріншоті зафіксовано момент часу, що передую моменту глибинного змикання. Глибинне змикання каверни відбувається на момент часу $t_{dc} = 0.127$ с, при цьому $V = 8.516$ м/с, $L_c = 0.767$ м.

Порівняння з Рис. 4б дозволяє відзначити якісну відповідність розрахунку та експерименту, незважаючи на те, що в експерименті модель досягла дна і припинила рух вже на глибині $H = 0.36$ м. Це свідчить про те, що після зупинки моделі каверна продовжує розвиватися згідно з принципом незалежності розширення перерізів каверни Г. В. Логвиновича [13].

7. ВИСНОВКИ

Розроблено методику експериментального дослідження входу та проникнення у воду моделей, що вільно летять під малими кутами до горизонту, а також обробки швидкісної

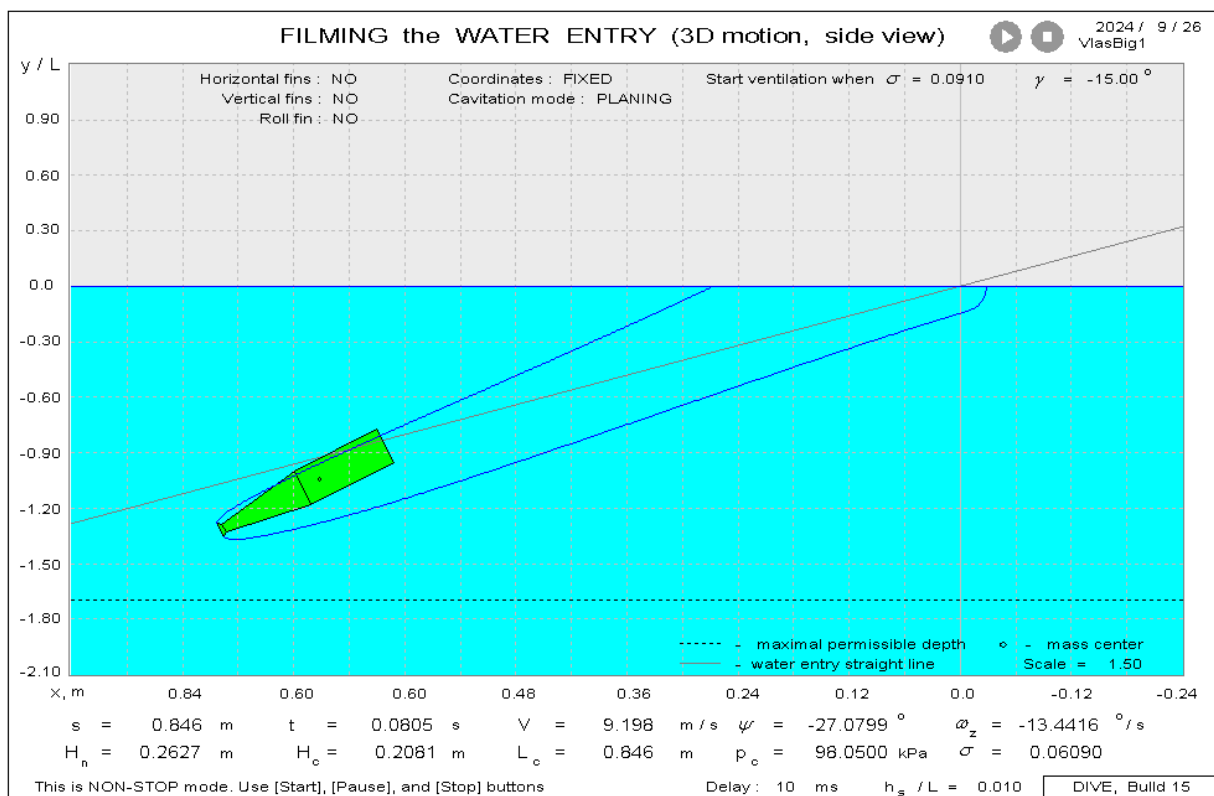


Рис. 18. Функція *Testing / Water Entry* програми DIVE_52: $t = 0.045 \text{ s}$

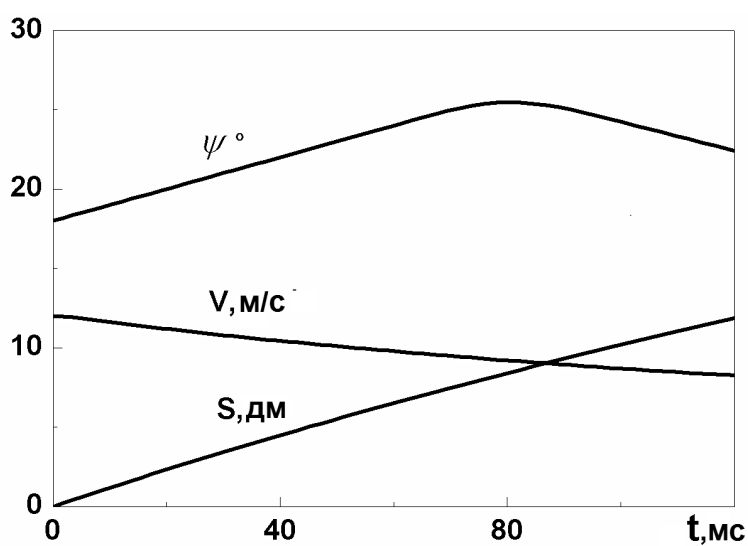
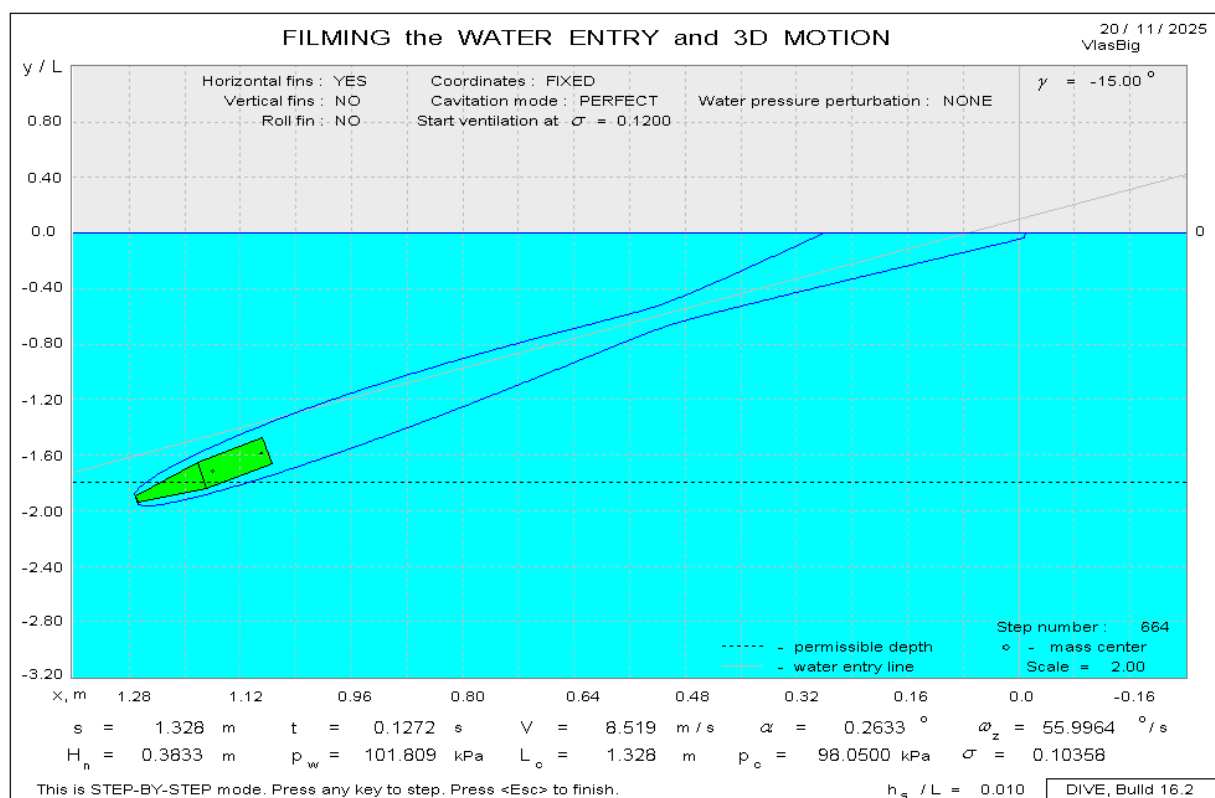


Рис. 19. Зміна параметрів руху

Рис. 20. Функція *Dynamics / Dive 2D* програми DIVE_16.2: глибинне змикання каверни

відео-реєстрації руху моделей та еволюції каверни.

Проведено серії випробувань по входу та проникненню моделі у воду під різними кутами. Отримано кінограми шляхом швидкісної відео-реєстрації (швидкість зйомки 1000 кадр/с). Шляхом обробки кінограм отримано графіки експериментальної залежності швидкості моделі, пройденої відстані та кута тангажу моделі від часу.

За підсумками випробувань описано чотири типи динамічної поведінки моделей залежно від початкових умов: проникнення у воду вздовж прямолінійної або криволінійної траєкторії в режимі суперкавітації; підводний рикошет (відскок); підводне перекидання моделі; поверхневий рикошет.

Дано оцінку характеру впливу положення центра мас моделі на динаміку моделі після входу в воду. Показано, що моделі з центром мас, зсунутим до корми, мають меншу стійкість до відхилень і демонструють її тим більше, чим більші бічні сили, викликані замивами або ударами на вході (поверхневий рикошет або підводне перекидання моделі).

Показано, що після досягнення моделлю дна каналу каверна продовжує розвиватися згідно з принципом незалежності розширення перерізів каверни Г. В. Логвиновича [13], зокрема, відбувається її глибинне змикання.

На основі результатів теоретичних досліджень та експериментальних даних запропоновано співвідношення для врахування впливу близькості вільної поверхні води на форму стаціонарних та нестаціонарних суперкаверн, що дозволило уточнити математичну модель і методику розрахунку динаміки суперкавітуючих моделей, що проникають

у воду під довільними кутами до вільної поверхні.

Уточнена методика розрахунку реалізована у вигляді демонстраційних комп'ютерних програми DIVE, призначених для комп'ютерного моделювання процесів проникнення моделей у воду і керованого руху саморушних суперкавітуючих моделей у воді, а також для порівняння результатів розрахунків входу у воду з експериментальними даними, отриманими у Лабораторії сучасної гідродинаміки Інституту гідромеханіки НАН України.

Наведено приклади комп'ютерного моделювання таких гідродинамічних процесів, як вхід та проникнення моделей у воду і глибинне змикання каверни. Дано оцінку ймовірності рикошету від поверхні води різних моделей на площині початкових параметрів входу у воду (γ, α).

Шляхом порівняння з експериментальними даними отримано оцінки величини коригуючого множника K_s при урахуванні впливу вільної поверхні води на форму каверни за формулами (12), (17): $K_s = (1.5 \dots 2)$ у випадках стаціонарного та нестаціонарного руху суперкавітуючих моделей та виходу суперкавітуючих моделей з води, $K_s = (2 \dots 3)$ у випадку формування каверни при вході моделей у воду під малими кутами до горизонту.

За допомогою розроблених програм змодельовано два типи динамічної поведінки моделей при вході та проникненні у воду залежно від початкових умов: 1) проникнення у воду вздовж прямолінійної траєкторії або з відхиленням траєкторії в режимі суперкавітації; 2) підводний рикошет (відскок). Комп'ютерне моделювання третього типу динамічної поведінки моделей, що спостерігається в експерименті (підводне перекидання моделі), неможливе в рамках даної математичної моделі.

Порівняння з експериментами показує, що дана уточнена математична модель дозволяє з задовільною точністю передбачити основні особливості гідродинамічних процесів при русі суперкавітуючих моделей на малих відстанях від вільної поверхні води і при високошвидкісному вході і проникненні моделей у воду під малими кутами до горизонту.

REFERENCES

- [1] S. I. Putilin, "Stability of supercavitating slender body during water entry and underwater motion," in *High Speed Body Motion in Water. AGARD Report 827*. Kyiv: IHM NSAU, 1997.
- [2] T. Truscott, D. Beal, and A. Techet, "Shallow-angle water entry of ballistic projectiles," in *Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation (CAV2009)*. Ann Arbor, MI: ASME, 2009, pp. 1–14.
- [3] T. T. Truscott, B. P. Epps, and J. Belden, "Water entry of projectiles," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 46, no. 1, pp. 355–378, 2014. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-011212-140753>
- [4] C. Chen, X. Yuan, X. Liu, and J. Dang, "Experimental and numerical study on the oblique water-entry impact of a cavitating vehicle with a disk cavitator," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 482–494, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2018.09.002>

- [5] A. Rabiee, M. Alishahi, H. Emdad, and B. Saranjam, “Experimental investigation of bounce phenomenon,” *Scientia Iranica*, vol. 18, no. 3, pp. 416–422, 2011.
- [6] G. Chen, J. Feng, J. Hu, Y. Li, and A. Liu, “The influence of initial conditions of water-entry on ricochet phenomenon,” *Fluid Dynamics Research*, vol. 49, no. 4, p. 045505, 2017. <https://doi.org/10.1088/1873-7005/aa747d>
- [7] G. Chen, J. Hu, A. Liu, J. Feng, and H. Shi, “Ricochet behavior of airвЂ“water trans-media vehicle during water-entry crossing,” *Fluid Dynamics Research*, vol. 51, no. 6, p. 065503, 2019. <https://doi.org/10.1088/1873-7005/ab4cff>
- [8] Y. N. Savchenko, Y. A. Semenov, Y. D. Vlasenko, and G. Y. Savchenko, “Water entry of a disk at small angles to a free surface,” in *Proceedings of the PTP† All-Ukrainian Scientific and Technology Conference ‘Underwater Engineering and Technology’*, Mykolaiv, 2021, pp. 3–9.
- [9] J.-H. Jo and Y.-S. Lee, “A study of ricochet phenomenon for inclined impact of projectile,” *International Journal of Modern Physics: Conference Series*, vol. 06, pp. 443–448, 2012. <https://doi.org/10.1142/s2010194512003583>
- [10] J.-G. Gao, Z.-H. Chen, Z.-G. Huang, W.-T. Wu, and Y.-J. Xiao, “Numerical investigations on the oblique water entry of high-speed projectiles,” *Applied Mathematics and Computation*, vol. 362, no. C, p. 124547, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2019.06.061>
- [11] M. A. Akbari, J. Mohammadi, and J. Fereidooni, “Stability of oblique water entry of cylindrical projectiles,” *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 14, no. 1, pp. 301–314, 2021. <https://doi.org/10.47176/jafm.14.01.31682>
- [12] Z. Li, H. Hu, C. Wang, Z. Xie, X. Chen, Z. Yuan, and P. Du, “Hydrodynamics and stability of oblique water entry in waves,” *Ocean Engineering*, vol. 292, p. 116506, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116506>
- [13] G. V. Logvinovich, *Hydrodynamics of flows with free boundaries*. Kyiv: Naukova Dumka, 1969.
- [14] V. N. Semenenko, “Artificial cavitation. physics and calculations,” in *RTO-AVT/VKI Special Course on Supercavitating Flows*. Brussels: VKI, 2002.
- [15] V. N. Semenenko and Y. I. Naumova, *Study of the supercavitating body dynamics*. Berlin; Heidelberg: Springer Verlag, 2011, pp. 147–176. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23656-3_9
- [16] V. A. Eroshin, N. I. Romanenkov, I. V. Serebryakov, and Y. V. Yakimov, “Hydrodynamic forces at body impact with the surface of a compressible fluid,” *Izvestiya AN SSR. Mehanka Zhidkosti i Gaza*, no. 6, p. 44вЂ“51, 1980.
- [17] O. P. Shorygin and N. A. Shulman, “Water penetration by the disk with an angle of attack,” *Uchenye Zapiski TsAGI*, vol. 8, no. 1, pp. 12–21, 1977.

- [18] G. V. Logvinovich and Y. L. Yakimov, “Immersion of bodies in liquid at high speeds,” in *Proceedings of the International Symposium ‘Unsteady Water Flows with High Speeds’*, Leningrad, 1971, pp. 85–92.
- [19] Y. Zhi, J. Zhan, R. Huang, Y. Wang, and N. Li, “Numerical investigation on the ventilated supercavity around a body under free surface effect,” *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 11, no. 5, p. 912, 2023. <https://doi.org/10.3390/jmse11050912>
- [20] V. Kochin, V. Moroz, V. Serebryakov, and N. Nechitailo, “Hydrodynamics of supercavitating bodies at an angle of attacks under conditions of considerable effect of fluid weightiness and closeness of free border,” *Journal of Shipping and Ocean Engineering*, vol. 5, no. 5, pp. 255–265, 2015. <https://doi.org/10.17265/2159-5879/2015.05.004>
- [21] L. A. Epshtein and V. M. Lapin, “An approximate evaluation of the effect of the flow boundaries on cavity length in the planar problem and past the axisymmetric body,” *Trudy TsAGI*, no. 2060, pp. 3–24, 1980.
- [22] I. T. Yegorov, Y. M. Sadovnikov, I. I. Isaev, and M. A. Basin, *Artificial cavitation*. Leningrad: Sudostroenie, 1971.
- [23] V. Semenenko, V. Moroz, V. Kochin, and O. Naumova, “Dynamics of supercavitating vehicles with cone cavitators,” *Mechanics and Advanced Technologies*, vol. 6, no. 1, pp. 85–95, 2022. <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2022.6.1.252889>

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Putilin S. I. Stability of supercavitating slender body during water entry and underwater motion // High Speed Body Motion in Water. AGARD Report 827. — Kyiv : IHM NSAU. — 1997.
- [2] Truscott T., Beal D., Techet A. Shallow-angle water entry of ballistic projectiles // Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation (CAV2009). — Ann Arbor, MI : ASME. — 2009. — P. 1–14.
- [3] Truscott T. T., Epps B. P., Belden J. Water entry of projectiles // Annual Review of Fluid Mechanics. — 2014. — Vol. 46, no. 1. — P. 355–378.
- [4] Experimental and numerical study on the oblique water-entry impact of a cavitating vehicle with a disk cavitator / Chen C., Yuan X., Liu X., and Dang J. // International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. — 2019. — Vol. 11, no. 1. — P. 482–494.
- [5] Experimental investigation of bounce phenomenon / Rabiee A., Alishahi M., Emdad H., and Saranjam B. // Scientia Iranica. — 2011. — Vol. 18, no. 3. — P. 416–422.
- [6] The influence of initial conditions of water-entry on ricochet phenomenon / Chen G., Feng J., Hu J., Li Y., and Liu A. // Fluid Dynamics Research. — 2017. — Vol. 49, no. 4. — P. 045505.

- [7] Ricochet behavior of air–water trans-media vehicle during water-entry crossing / Chen G., Hu J., Liu A., Feng J., and Shi H. // Fluid Dynamics Research. — 2019. — Vol. 51, no. 6. — P. 065503.
- [8] Water entry of a disk at small angles to a free surface / Savchenko Y. N., Semenov Y. A., Vlasenko Y. D. і Savchenko G. Y. // Матеріали XI Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Підводна техніка і технологія». — Миколаїв. — 2021. — С. 3–9.
- [9] Jo J.-H., Lee Y.-S. A study of ricochet phenomenon for inclined impact of projectile // International Journal of Modern Physics: Conference Series. — 2012. — Vol. 06. — P. 443–448.
- [10] Numerical investigations on the oblique water entry of high-speed projectiles / Gao J.-G., Chen Z.-H., Huang Z.-G., Wu W.-T., and Xiao Y.-J. // Applied Mathematics and Computation. — 2019. — Vol. 362, no. C. — P. 124547.
- [11] Akbari M. A., Mohammadi J., Fereidooni J. Stability of oblique water entry of cylindrical projectiles // Journal of Applied Fluid Mechanics. — 2021. — Vol. 14, no. 1. — P. 301–314.
- [12] Hydrodynamics and stability of oblique water entry in waves / Li Z., Hu H., Wang C., Xie Z., Chen X., Yuan Z., and Du P. // Ocean Engineering. — 2024. — Vol. 292. — P. 116506.
- [13] Логвинович Г. В. Гидродинамика течений со свободными границами. — Наукова думка, 1969. — 208 с.
- [14] Semenenko V. N. Artificial cavitation. Physics and calculations // RTO-AVT/VKI Special Course on Supercavitating Flows. — Brussels : VKI, 2002.
- [15] Semenenko V. N., Naumova Y. I. Study of the supercavitating body dynamics // Supercavitation. — Berlin; Heidelberg : Springer Verlag, 2011. — P. 147–176.
- [16] Гидродинамические силы при ударе тел о поверхность сжимаемой жидкости / Ерошин В. А., Романенков Н. И., Серебряков И. В. и Якимов Ю. В. // Известия АН СССР, Механика жидкости и газа. — 1980. — № 6. — С. 44–51.
- [17] Шорыгин О. П., Шульман Н. А. Вход в воду диска с углом атаки // Ученые записки ЦАГИ. — 1977. — Т. 8, № 1. — С. 12–21.
- [18] Логвинович Г. В., Якимов Ю. Л. Погружение тел в жидкость с большими скоростями // Труды международного симпозиума «Неустановившиеся течения воды с большими скоростями». — Ленинград. — 1971. — С. 85–92.
- [19] Numerical investigation on the ventilated supercavity around a body under free surface effect / Zhi Y., Zhan J., Huang R., Wang Y., and Li N. // Journal of Marine Science and Engineering. — 2023. — Vol. 11, no. 5. — P. 912.

- [20] Hydrodynamics of supercavitating bodies at an angle of attacks under conditions of considerable effect of fluid weightiness and closeness of free border / Kochin V., Moroz V., Serebryakov V., and Nechitailo N. // Journal of Shipping and Ocean Engineering. — 2015. — Vol. 5, no. 5. — P. 255–265.
- [21] Эпштейн Л. А., Лапин В. М. Приближенный расчет влияния границ потока на длину каверны в плоской задаче и за осесимметричным телом // Труды ЦАГИ. — 1980. — № 2060. — С. 3–24.
- [22] Искусственная кавитация / Егоров И. Т., Садовников Ю. М., Исаев И. И. и Басин М. А. — Ленинград : Судостроение, 1971. — 280 с.
- [23] Dynamics of supercavitating vehicles with cone cavitators / Semenenko V., Moroz V., Kochin V., and Naumova O. // Mechanics and Advanced Technologies. — 2022. — Vol. 6, no. 1. — P. 85–95.

Yu. M. Savchenko, V. M. Semenenko, G. Yu. Savchenko, O. I. Naumova
Experimental study and computer simulation of dynamics
of supercavitating bodies penetrating water
at small angles to the free surface

The paper deals with developing the methodology of experimental study of the water entry and penetration by the models flying freely at small angles to the horizon. The model water penetration with the velocities of 10 m/s to 25 m/s was tested for angles of 4° to 15°. The photo sequences of the model motion and the cavity development have been obtained by high-speed video recording (the shooting speed is 1000 frames/s). The graphs of the experimental dependence of the model velocity, the flight distance, and the model pitch angle on time have been obtained by processing the photo sequences. Four types of dynamic behavior of models are described: water penetration in the supercavitation regime, underwater ricochet (the bounce), the model underwater rolling, and water-surface ricochet. The model mass center position effect on the model dynamics after the water entry is evaluated. The models with the mass center shifted to the tail occur less stably. The mathematical model and the method for calculating the supercavitation model dynamics, based on the principle of independence of the cavity section expansion by G. V. Logvinovich, are refined by the allowance for the free surface effect on the supercavity shape. This calculation method is implemented in the demonstration computer programs DIVE. Examples of computer simulations of hydrodynamic processes of different model water entry and water penetration are given. An estimation of the water surface ricochet probability on the plane of the starting parameters is given for different models. A comparison of the calculation results with the experimental data shows that this refined mathematical model allows us to correctly predict the main features of hydrodynamic processes at the supercavitating model's motion near the free surface and at the model water penetration under small angles to the free surface.

KEY WORDS: *water entry, supercavitation, dynamics, ricochet, computer simulation*