

Технічні науки

УДК 629.07.54

Асафтей Олена Антонівна

асистент кафедри біотехніки та інженерії,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут ім. І.Сікорського”

Асафтей Елена Антоновна

ассистент кафедры биотехники и инженерии,
Национальный технический университет Украины
“Киевский политехнический институт
им. И.Сикорского”

Asaftei E.

assistant Department of bioengineering and biotechnics,
National Technical University of Ukraine,
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

ВПЛИВ ПЛОСКОЇ АКУСТИЧНОЇ ХВИЛІ НА ПІДВОДНИЙ СТАРТ АПАРАТУ

Анотація. Дослідження відносяться до області прикладної механіки та присвячені вивченню впливу акустичної хвилі тиску на підводний апарат при старті. Приводиться диференціальне рівняння руху підводного об'єкта в спрощеному вигляді. Проаналізований випадок примусового руху підводного апарата довільної геометричної форми при поступальному й кутовому русі в напрямку трьох осей.

Ключові слова: переміщення, рідина, акустична хвиля тиску, підводний апарат.

Аннотация. Исследования относятся к области прикладной механики и посвящены изучению влияния акустической волны давления на

подводный аппарат при старте. Приводится дифференциальное уравнение движения подводного объекта в упрощенном виде. Проанализирован случай принудительного движения подводного аппарата произвольной геометрической формы при поступательном и угловом движении в направлении трех осей.

Ключевые слова: *перемещение, жидкость, акустическая волна давления, подводный аппарат.*

Summary. *The investigations pertain to the field of applied mechanics and address the effect of acoustic pressure waves on underwater vehicle during its start. The differential equation of motion of an underwater object is given in a simplified form. We analyze the case of forced motion of an underwater vehicle of arbitrary shape during its translational and angular motion in three axes.*

Keywords: *moving, liquid, acoustic pressure wave, underwater vehicle.*

1. Вступ

В державах з протяжною береговою лінією система захисту власних рубежів повинна незмінно включати в себе заходи протичовнової оборони. В сучасних умовах підводним човнам належить провідна роль в озброєній боротьбі на морі. Поєднуючи в собі такі фактори як прихованість, захищеність, рухливість та здатність до самооборони, підводні човни спроможні винищувати наземні об'єкти, ракетні підводні човни, угруповання надводних кораблів, порушувати комунікації. З появою підводних човнів-ракетоносців, в першу чергу атомних, військово-морський флот постає спроможним чинити стратегічний вплив на хід та наслідок сучасної війни. Саме з огляду на цей аспект, проблема боротьби з підводними човнами – носіями балістичних ракет – уявляється проблемою надзвичайної ваги.

Нетривалий політний час балістичних ракет, які стартують з підводних човнів (близько 15 хвилин при польоті на дальність 2800 км по

нормальним траєкторіям та 7-8 хвилин при польоті на знижених траєкторіях), може виявитися недостатнім для прийняття контрзаходів. Проектуються також надмалі човни, водотоннажністю від 200 кг до 35 тонн, які призначені перш за все для диверсій, розвідки та наведення керованих ракет.

Все це свідчить про подальше зростання ролі підводного флоту та розширення кола тих задач, що покладаються на нього в сучасних умовах. З огляду на зазначене, питанням боротьби з підводними човнами приділяється все більше уваги. Успіх цієї проблеми буде залежати перш за все від своєчасного виявлення, класифікації та визначення місцезнаходження підводної цілі. Розв'язання цих задач доручається головним чином гідроакустичним засобам. Ехолокація залишається надійним шляхом викриття підводної цілі на теперішній час та в осяжній перспективі.

2. Постановка проблеми

Проаналізуємо рух підводного апарату, розглядаючи його у першому наближенні як коловий жорсткий, або пружно-деформований, циліндр, занурений в ідеальну стисливу рідину, під дією плоскої акустичної хвилі. Тиск за фронтом змінюється у часі ступінчасто або експоненціально. Такий режим може мати місце, наприклад, при підводному бомбардуванні. З цією метою застосуємо операційний метод за умови виконання наближених співвідношень для потенціалів відбитих та випромінених хвиль, що придатно для початкового і кінцевого інтервалів часу.

3. Аналіз літературних даних

Точний вираз граничного переміщення тіла, що має дві площини симетрії, вперше отриманий В.В. Новожиловим [1]. Надалі, цей вираз був узагальнений на пружно-деформуємі тіла Л.І. Слепяном [2]. Задача про рух нескінченного колового циліндра у наближеній постановці вивчалася у статті [3], а у випадку еліптичного циліндру – в роботі [4]. Докладний опис руху тіл іншої конфігурації наводиться в монографії [5].

Можливість використання наближених співвідношень для гідродинамічних тисків при розв'язанні задач вимушеного руху твердих тіл, зокрема циліндру, за умови ступінчастої зміни акустичного навантаження висвітлена в роботах [6, 7].

4. Апарат вільний від закріплень

Розглянемо, як найбільш простий, випадок плоского потоку, в якому розміщений апарат у формі нескінченного за протяжністю циліндра з утворюючими, що перпендикулярні площині течії. Обмежимо коло аналізуємих задач вивченням безвихорового потоку нестисливої рідини.

Припустимо, що в оточуючій підводній апарат рідині поширюється нестационарна хвиля тиску з потенціалом (рис. 1)

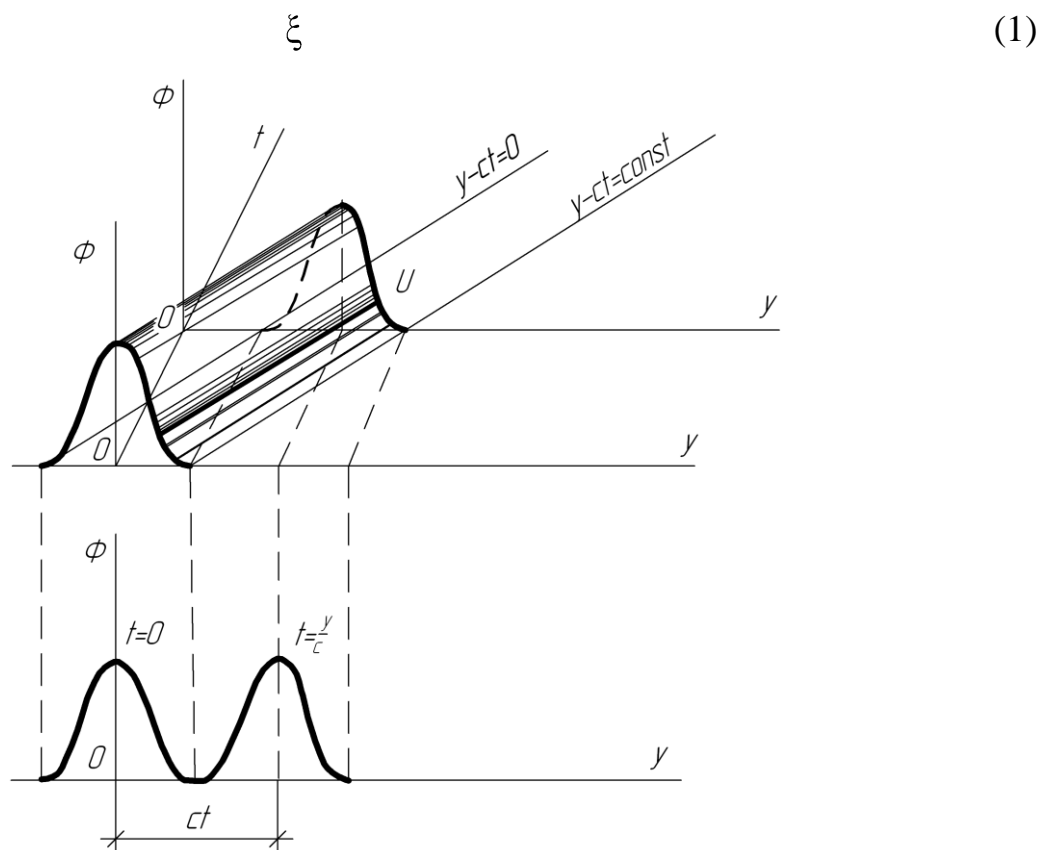


Рис. 1. Потенціал швидкості акустичної хвилі тиску

Вважаємо наявність в рухомому об'єкті двох взаємно-перпендикулярних площин геометричної і масової симетрії, які початково перпендикулярні до фронту діючої хвилі.

Це обмеження дозволить надалі уникнути громіздких обчислень. Хоча, слід зазначити, задача може бути розв'язана і для випадку довільної геометрії корпусу.

Переміщеннями апарату внаслідок наявної надлишкової або негативної плавучості будемо нехтувати.

Стосовно функції потенціалу ξ висловим наступну думку. Вона прямує до певної границі за умови \dots . Останнє зауваження слід тлумачити таким чином, що повний імпульс хвилі тиску

за весь час дії \dots вважається обмеженим.

Функція \dots має незмінний профіль, що переміщується в напрямку осі \dots із швидкістю "с" (рис. 1). У фазовій площині \dots функція зберігає сталі значення на лініях \dots . Поверхня \dots – циліндрична, а її утворюючі паралельні до прямої \dots . Напрямна поверхні – крива \dots при \dots , тобто \dots (2)

Доведемо, що за прийнятих припущень стосовно властивостей діючої акустичної хвилі тиску, переміщення підводного апарату (в режимі "стоп-машина") буде наближатися до деякої границі при \dots . Окрім того, обчислимо цю величину.

Задача розв'язується в акустичному наближенні.

Зміна кількості руху за час \dots дорівнює повному імпульсу сили за цей час. Сила \dots , що діє на корпус підводного апарату, дорівнює частинній похідній у часі від потенціалу, тобто \dots

Векторне поле називається потенціальним, якщо воно являється градієнтом деякого скалярного поля, тобто

Скалярне поле іменується потенціалом поля . Знак “мінус” перед обраний для зручності. Відповідно до нашої задачі, це означає, що в напрямку вектора елементарний імпульс сили

спадний.

Отже, за припущення симетрії корпусу, апарат буде примусово переміщуватися в напрямку діючої хвилі тиску, іншими словами, в напрямку осі .

Диференціальне рівняння руху підводного об'єкту, в межах обумовлених спрощень, можна записати у вигляді

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{d^2y}{dt^2} + \frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{1}{\rho} \nabla^2 \Phi \quad (3)$$

де Φ – примусове переміщення підводного апарату внаслідок дії акустичної хвилі тиску; m – маса апарату; ρ – щільність середовища; \mathbf{n} – напрям зовнішньої нормалі до поверхні корпусу; R – контур поперечного перерізу у площині шпангоута; $\cos \theta$ – косинус кута між зовнішньою нормаллю та оссю z ; інтегрування проводиться по всій поверхні S ; Φ_0 – потенціал дифракційної хвилі, який підпорядкований тривимірному хвильовому рівнянню Лапласа

$$\nabla^2 \Phi_0 = 0 \quad (4)$$

і початковим умовам

Якщо

тоді функція _____, а на поверхні корпусу апарата має місце умова _____

В циліндричних координатах виконуються співвідношення –

Двічі зінтегрувавши рівняння в межах від нуля до _____, отримуємо

де

Переміщення часток оточуючої апарат рідини виражаються через ці дві функції формулами:

де _____ – переміщення, породжене падаючою хвилею за припущення відсутності апарату в воді; _____ – додаткове переміщення, що обумовлене дифракцією.

Падаюча хвиля розповсюджується в напрямку _____, тому –

Функція _____ підпорядкована рівнянню _____

та граничним умовам на поверхні корпусу апарату _____

Вирази (11) та (12) одержані після інтегрування у часі рівнянь (4) та (6) з урахуванням умов (5).

З самого початку було обумовлено, що імпульс хвилі тиску обмежений, тому i , відповідно, переміщення буде також скінченим за величиною прямуючи при $t \rightarrow \infty$ до граничного значення

—

Потенціал падаючої хвилі ϕ , природно, його інтеграл $\int \phi dt$ не мають особливостей всередині області, займаємої корпусом підводного апарату. Виходячи з цього, можна записати:

—

Стосовно другого з інтегралів у виразі (7), то згідно (12), він може бути наведений у вигляді:

—

Отже, перетворення (1.19), (1.20) дозволять вираз (1.12) належним чином змінити:

—

Щоб, врешті решт, обчислити переміщення підводного апарату під дією хвилі тиску треба знати функцію $\phi(t)$, а це, при узагальненій постановці задачі, неможливо. Тому має сенс шукати не величину $\phi(t)$, а остаточне переміщення об'єкту, тобто Δz

Але цього граничного значення може і не бути. Так, якби хвиля тиску мала вигляд стрибка, то внаслідок її дії незакріплений апарат отримав би

якусь сталу швидкість. Разом з тим, якщо повний імпульс тиску обмежений, тоді частки води одержать визначені переміщення і можна очікувати, що за цих умов визначеним буде і переміщення підводного апарату.

Припустимо, що це саме так і проаналізуємо, до чого призведе така гадка.

Нехай при \dots . Тоді з рівняння (16) походить, що

—

де \dots – маса витисненої апаратом води.

Таким чином, слід знайти

— —

де

Як вже зазначалося [8, 9], функція \dots підпорядкована рівнянню (11), права частина якого прямує до нуля при \dots , бо пропорційна тиску в дифракційній хвилі. Тому \dots буде функцією гармонічною. Вона згасаюча при \dots , а на поверхні корпусу підводного апарату дотримується умови

—

Звідси походить, що \dots може бути ототожнена з потенціалом течії безмежної ідеальної рідини коли в ній рухається вивчасний підводний об'єкт із сталою швидкістю \dots в напрямку осі \dots . Зазначимо, що в межах інтересів поставленої задачі, нас цікавить не сама ця функція, а лише інтеграл (19).

Перетворимо його за формулою Дж. Гріна, за умови, що при

—

функція прямує до нуля як . Отже,

$$\dots - \dots - \dots - \dots - \dots$$

І, таким чином, задача зведена до обчислення інтегралу

$$\dots - \dots - \dots - \dots$$

Але це є кінетична енергія ідеальної нестисливої рідини в задачі з граничними умовами (21). Тому можна записати:

$$\dots - \dots \tag{24}$$

де – коефіцієнт приєднаної маси для циліндра, що рухається в напрямку осі .

З урахуванням виразів (21)...(24), формула (17) набуває вигляду

Розв'язавши це рівняння відносно , одержуємо значення примусового переміщення підводного апарату (рис. 2):

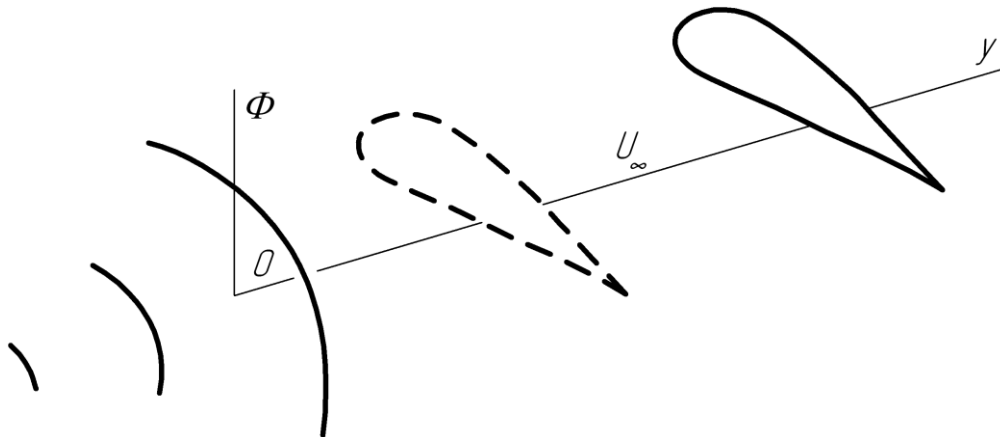


Рис. 2. Граничне переміщення підводного апарату під дією акустичної хвилі тиску

Таким чином, думка стосовно існування граничного значення переміщення (17) виявилася слушною, бо не приводить до протиріч з виразом (26).

Проаналізований випадок примусового переміщення підводного апарату можна розширити і розглядати об'єкт як абсолютно тверде тіло довільної геометричної форми. На відміну від розглянутого, буде мати місце не тільки поступальний рух, але і кутовий, відносно всіх трьох осей. Для шести невідомих, міркуючи аналогічно, можна побудувати лінійну алгебраїчну систему, коефіцієнти якої будуть залежати від 21 коефіцієнта приєднаних мас і статичних моментів мас.

5. Апробація результатів досліджень

Побудовані розрахункові схеми і отримані результати доводять, що за досить малого тертя і досить великого ρ , за період часу переміщення підводного апарату буде цілком окреслюватися першим доданком формули, тобто

$$\frac{1}{2} \rho V \dot{x}^2$$

6. Висновки

Таким чином, що за одиничного зміщення для узагальненої сили F в реальній рідині має місце рівність

З плином часу t , переміщення підводного човна зменшується, якщо $\rho < \rho_0$. І, навпаки, збільшується, якщо $\rho > \rho_0$.

Можна задачу розширити, обмеживши стан підводного апарату якорем.

Література

1. Новожилов В. В. О перемещении абсолютно твердого тела под действием акустической волны давления // Прикл. матем. и мех. Т. XXIII. – Вып. 4, 1959. – С. 794 – 797.
2. Слепян Л. Н. О перемещении деформируемого тела в акустической среде // Прикл. матем. и мех. Т. XXVII. – Вып. 5, 1963. – С. 918 – 923.
3. Naywood J, H. Response of an elastic cylindrical shell to a pressure pulse. *Quartj. mech. and appl. math.*, vol. 11, part 2, 1958. – P. 181 – 187.
4. Вороненок Е. Я. О дифракции акустической волны давления на бесконечном круговом цилиндре// *Механика*,– М.: Изв. АН СССР №3, 1965. – С. 117 – 121.
5. Замышляев Б. В., Яковлев Ю. С. Динамические нагрузки при подводном взрыве. – Л.: Изд-во «Судностроение», 1967. – 197 с.
6. Григолюк Э. И., Горшков А. Г. Перемещение жесткого цилиндра под действием акустической волны давления // *Прикл. механика*, 1968, 4, №10. – С. 1 – 5.
7. Григолюк Э. И., Горшков А. Г. Нестационарные колебания при ударе в акустической среде // *Переходные процессы деформации пластин и оболочек*. Таллин, ЦБТИ ЭССР, 1967. – С. 37 – 45.
8. Mel'nik, V.N. Influence of acoustic radiation on the sensors of a gyrostabilized platform [Текст]/ V.N. Mel'nik, V.V. Karachun// 2004; *Prikladnaya Mekhanika*. ISSN: 00328243. Volume: 40. Issue: 10. Pages: 122-130. Year: 2004-12-01. EID: 2-s2.0-14844342416. Scopus ID: 14844342416.
9. Karachun, V.V. Elastic stress state of a floating-type suspension in the acoustic field. Deviation of the spin axis [Текст]/ V.V. Karachun, V.N. Mel'nik // *Strength of Materials*. ISSN: 00392316. Volume: 44. Issue: 6. Pages: 668-677. Year: 2012-11-01. EID: 2-s2.0-84961216138. Scopus ID: 84961216138. DOI: 10.1007/s11223-012-9421-2.