



Карачун В. В.,
Мельник В. М.,
Фесенко С. В.

ДИФРАКЦІЯ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ НА МЕТАЛЕВОМУ КІЛЬЦІ

Проведено аналіз результатів напівнатурних випробувань мідного кільця, зануреного у рідину і підвладного дії зовнішнього звукового випромінювання. Розкрито природу формування в рідині концентрації звукових хвиль у вигляді поверхні каустики. Пояснено причини концентрації звукових хвиль і виникнення глобального і локальних рушійних потоків рідини. Проаналізовано енергетичний стан рідини усередині обмеженого кільцем простору при різних напрямках дії звукового променя з плоским фронтом.

Ключові слова: каустика, аберація, хвильовий розмір, концентрація звукових хвиль, рушійний потік, дифракція.

1. Вступ

Бортова апаратура, зокрема сенсори кінематичних характеристик, високоманеврених літальних апаратів в експлуатаційних умовах підвладні дії проникаючого потужного акустичного випромінювання та ударної *N*-хвилі. Зокрема, йдеться про глайдери, під час переходу від режиму баражування до форм-мажорного. Особливості розповсюдження звукових хвиль в пілотажному та навігаційному обладнанні, в першу чергу поліагрегатної структури, чинять істотний вплив на технічні характеристики обладнання і на тактико-технічні характеристики літальних виробів в цілому.

Дифракційні явища формують резонансну ситуацію в механічних системах систем управління літального апарату та в навігаційному обладнанні. Структура цих явищ окреслена проявом хвильового співпадання та *zone kaustikos*, які будують розвивати у часі і просторі тривимірну турбулентність рідинних складових, а в твердотільних елементах — «акустичну прозорість» з усіма породженими цим явищем вадами бортової апаратури. В першу чергу це стосується гіперзвукових літальних апаратів суборбітального та атмосферного призначення міжконтинентальної зони дії.

Ефективні технічні рішення боротьби з впливом проникаючого акустичного випромінювання слід впроваджувати на глибокому розумінні дифракційних явищ в натурних умовах пілотуємих і безпілотних виробів.

2. Об'єкт досліджень та його технологічний аудит

Об'єктом досліджень слугує взаємодія ультразвукового променя експлуатаційних умов використання гіперзвукових літальних апаратів з бортовою апаратурою управління і навігації, зокрема, з багатозональними структурами і наявними рідинностатичними елементами.

Надзорські експлуатаційні умови гіперзвукових льотних виробів поряд з високими тактико-технічними характеристиками породжують і потужні зовнішні збурення, які, до речі, здатні звести до нуля паспортні переваги гіперзвукових технологій, тому вивчення і усунення цих збурень являє собою актуальну задачу, яка потребує детального вивчення і розв'язання.

3. Мета та задачі дослідження

Здійснені напівнатурні дослідження пружної взаємодії ультразвукового випромінювання з металевим кільцем ставили за мету з'ясування природи дифракційних явищ на кільцевому елементі сенсорів позиціонування гіперзвукових літальних апаратів, з'ясування розподілу локальних зон енергетичної активності оточуючої рідини та особливості тривимірної турбулентності в акустичному середовищі.

Для досягнення поставленої мети слід:

1. Відтворити на стенді ультразвуковий промінь з плоским фронтом і забезпечити зміну його орієнтації відповідно до експлуатаційних умов.

2. З'ясувати динаміку локальних і глобальних рушійних потоків рідини, наявність температурного градієнту рідини та його розвиток у часі.

4. Аналіз літературних даних

Відомо, що на звукове випромінювання витрачається близько 1 % механічної потужності двигунів. Загальний рівень акустичного поля в районі реактивного струменя, наприклад, може досягати 180 дБ, ширина частотної смуги — 0...10 кГц. Такі режими спостерігаються при старті ракет з поверхні Землі або з шахт [1]. Природно, що звуковий тиск такої інтенсивності зробить істотний вплив на власне конструкцію ЛА, а також і на прилади командно-вимірювального комплексу. Шум реактивного струменя, володіючи широким спектром частот і випадковим характером зміни величини звукового тиску, що призведе до виникнення в механічних системах бортової апаратури безлічі форм коливань, в тому числі і резонансних. У своїй сукупності хвильові процеси, як показують результати експериментальних досліджень, приведуть до порушення нормального режиму функціонування приладів і, зрештою, до погіршення тактико-технічних характеристик виробів в цілому, що виллється в необхідність вирішення додаткових нештатних завдань експлуатації РН і виведення КА, не передбачених Технічними умовами [2, 3].

Досягнення практичної космонавтики істотно розширили і вивели на якісно вищий щабель сформовані уявлення про характер розсіювання енергії акустичних

полів у механічних системах бортової апаратури літальних апаратів [4].

Рідке середовище, призначене для зважування рухомої частини гіроскопа і демпфірування коливань, яке є кращим провідником звуку ніж газоподібна фаза, дозволяє безперешкодно проникнути акустичному випромінюванню усередину приладу не стільки через опори, скільки через корпус. Таким чином, гіроскоп виявляється з цієї сторони повністю незахищеним. Генеруємі в підвісі хвильові процеси приведуть у своїй сукупності до похибок вимірювань. Вперше на це явище звернули увагу автори роботи [5] при вивченні динаміки бортової апаратури РН «Енергія». Перші результати були отримані, наприклад, для багатофазних механічних систем [6].

Встановлено, що найбільшої величини акустичні навантаження від шуму реактивного струменя досягають на Землі і під час старту РН. Зі збільшенням швидкості польоту їх вплив зменшується, але при цьому зростають навантаження, обумовлені пульсацією тиску в турбулентному пограничному шарі [7, 8]. На літаках з турбогвинтовими двигунами створюється змінний тиск на панелі фіюзеляжу, головним чином у зоні обертання гвинта [9].

Особливістю випромінювання звуку аеродинамічним потоком є наявність сферичних звукових хвиль та гостроспрямованих інтенсивних хвиль Маха, які і є основним джерелом шуму. Величина середнього квадрата акустичного тиску P , наприклад, високошвидкісних ракет, може бути визначена за відомою формулою [10, 11]:

$$\bar{P}^2 \sim \epsilon^5 \ell^2 |y|^{-2} (\rho U)^2 M^4 \left[(1 - M \cos \Theta)^2 + \epsilon^2 M^2 \right]^{\frac{5}{2}},$$

де M — число Маха; Θ — кут між напрямком руху вихрів і напрямком випромінювання; ϵ — безрозмірний коефіцієнт рівня турбулентності. При малих швидкостях руху це рівняння виражає відомий закон «восьмий ступеня» Лайтхилла. Причому найбільший інтерес представляє випадок, коли $M \cos \Theta = 1$, що відповідає максимуму шуму, випромінюваного струменем ракетного двигуна.

Шум ракетних двигунів поширюється як через навколишнє середовище, так і через елементи конструкції ракети-носія — подібно звуковому містку — в результаті виникнення в матеріалі горизонтально (SH-хвиля) і вертикально (SV-хвиля) поляризованих хвиль, а також їх суперпозиції (еліптична поляризація) [12]. Крім того, проявляються хвилі Стоунлі, які локалізуються поблизу кордону поверхні корпусу і є результатом виникнення явищ резонансного типу.

Дослідження показали, що частина звукової енергії поглинається ребрами шпангоутів, а частина — погонною масою оболонки ракети-носія. Причому, повний опір, наприклад, для космічних апаратів, визначається сумою внутрішнього механічного опору конструкції і опором випромінювання у вигляді потоку енергії з конструкції в середовище [10]. Вивчення впливу акустичних впливів на міцність елементів конструкції ЛА має досить тривалу історію розвитку. У той же час, експериментальна і теоретична оцінки впливу звукового випромінювання на бортову апаратуру (особливо в полях високої інтенсивності — вище 150 дБ) отримали розвиток порівняно недавно [13, 14].

Прилади інерціальної навігації знайшли широке застосування у багатьох виробництвах, зокрема, в ракетно-космічній техніці [15, 16]. Подібна затребуваність пояснюється чудовою властивістю інерціальних систем, властивою тільки їм, та автономністю [17].

Іноді з'являються критичні зауваження щодо можливостей інерціальних навігаційних систем для сучасних технологій [18].

Представляється доцільним всі подальші міркування будувати, орієнтуючись на конкретну технічну реалізацію серійно випускаемого авіаційною промисловістю поплавкового приладу. Наприклад, на гіроскопічний датчик кутових швидкостей, уніфікований, типу ДУСУ2-6АС, призначений для використання в літальних апаратах тривалої дії.

5. Матеріали та методи досліджень

Основою випробувального стенду являється поглиблюваний блок ультразвукових випромінювачів марки УЗП-6-1, який формує ультразвуковий промінь частотою 42 кГц з плоским фронтом.

Усередину заповненого водою корпусу стенду, розміщується циліндрична посудина з рідиною, поздовжня ось якої співпадає з віссю ультразвукового променя у 42 кГц.

За предмет досліджень обране мідне кільце, площина якого може займати три положення — паралельно до площини фронту ультразвукового променя, перпендикулярно до фронту променя і, нарешті, під кутом 45° до фронту променя.

Для зручності подальшого порівняльного аналізу, спочатку з'ясуємо стан рідини в посудині без мідного кільця. Ультразвуковий промінь, як видно, породжує потужний рушійний потік «1» у вигляді висхідної циліндричної спіралі (рис. 1). Поверхня рідини в посудині, відповідно, буде турбулізуватися (рис. 2).

Першопричиною формування рушійного потоку «1» буде слугувати циліндрична зона каустики (*zone kaustikos*), яка викликана аберрацією звукових хвиль, діючих ззовні на посудину. Відбувається фокусування енергії акустичного випромінювання в циліндричній посудині з рідиною.

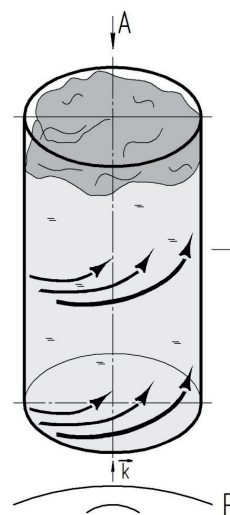


Рис. 1. Дія ультразвукового променя на рідину: P — акустичне випромінювання; \vec{k} — хвильовий вектор

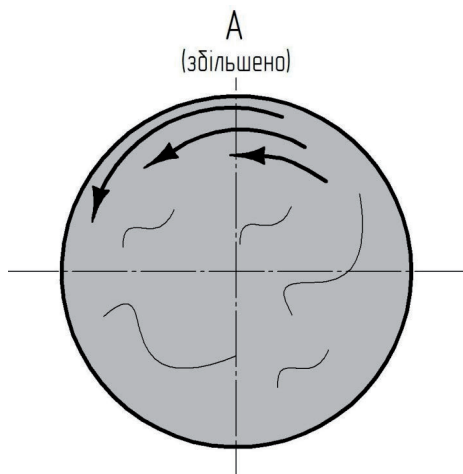


Рис. 2. Турбулентний стан поверхні рідини

6. Результати досліджень

Вважаючи оболонкову частину посудини за таку, хвильовий розмір якої $1 \ll kR$, де R — радіус посудини, k — хвильове число, припустимо вважати окремий елемент поверхні за пластину нульової кривизни і, таким чином, стверджувати, що швидкість поздовжніх коливань співпадає з коловою швидкістю посудини.

Якщо швидкість $V_{\text{пд}}$ поздовжньої хвилі перевищує швидкість звука c_0 в рідині, тобто:

$$c_0 < V_{\text{пд}},$$

тоді бігуча в посудині хвиля буде випромінювати звукову хвилю в рідину, причому напрям її буде складати з вектором швидкості $\vec{V}_{\text{пд}}$ кута α , який окреслений співвідношенням:

$$\sin \alpha = \frac{c_0}{V_{\text{пд}}}.$$

Аналогічно для згинних коливань оболонки, коли швидкість згинної хвилі $V_{\text{зг}}$ перевищує швидкість звуку в рідині $V_{\text{зг}} \ll c_0$. Оболонка буде випромінювати також звукову хвилю в рідину, але під кутом β до швидкості згинних коливань.

Експеримент твердить, що *zone kaustikos* конфокальні внутрішній поверхні циліндричної посудини.

Як з'ясувалося, ультразвуковий промінь, окрім зміни динамічного стану рідини, нагріває її від «кімнатного» рівня у 22°C до 28°C , створюючи безградієнтний тепловий стан рідини по всьому об'єму (рис. 3). Таким чином, відсутність градієнта тепла піде на користь приладам бортової апаратури з рідинними складовими. В першу чергу, це стосується інтегруючого гіроскопа та гіроскопічного датчика кутових швидкостей класу ДУСУ.

Нагрівання рідини до сталої температури 28°C чиниться за 900 секунд. Надалі температура залишається сталою по всьому об'єму.

З'ясовано, що для питної води підвищення температури на випробувальному стенді здійснюється за 15 хв. Для важких рідин, які використовуються в якості рідинно-статичного підвісу рухомої частини, цей термін має індивідуальний інтервал і для кожного виду повинен визначатися експериментально.

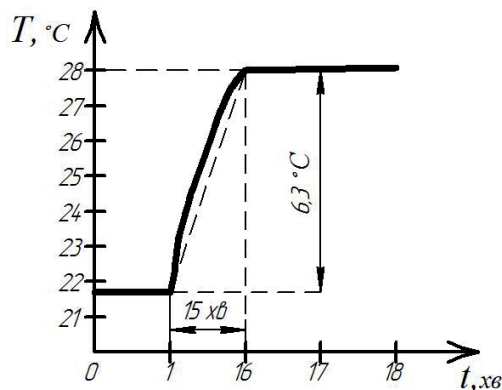


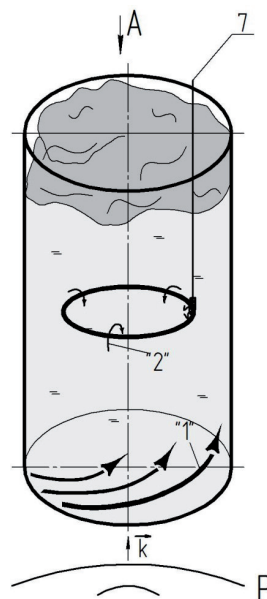
Рис. 3. Зміна температури рідини під дією ультразвукового променя

Присутність мідного кільця усередині посудини вносить свій внесок в перебіг подій, утворюючи зони концентрації звукової енергії і зони звукової тіні.

Коли площа кільця перпендикулярна до осі посудини і центр кільця співпадає з віссю циліндричної посудини, в замкнутому просторі мідного кільця утворюються сектори активної і пасивної енергетики рідини (рис. 4).

Темні сектори відображають турбулентний стан рідини, світлі сектори — окреслюють статичний стан рідини (рис. 5).

Глобальний рушійний потік «1» залишається таким самим за структурою, але додатково з'являються локальні обмивні потоки «2» і «3». Перші обтікають кільце усередину з меншою енергетикою, а другий постає плинним потоком навколо осі посудини (рис. 4).

Рис. 4. Дія ультразвукового променя P на мідне кільце в посудині з рідиною: «1» — глобальний рушійний потік, «2» — локальний обмивний потік, 7 — тримач мідного кільця

Темні сектори кільця відображають зони концентрації звукової енергії. Навпаки, світлі сектори — окреслюють зони акустичної тіні, які утворюються внаслідок взаємодії різних типів звукових хвиль в заданому об'ємі.

В тому випадку, коли центр площі кільця співпадає з віссю посудини і перпендикулярна до неї, чередування зон концентрації звукової енергії змінюється і містить

попарні взаємно перпендикулярні центральні колові сектори концентрації звукової енергії і світлі сектори акустичної тіні (рис. 6, а).

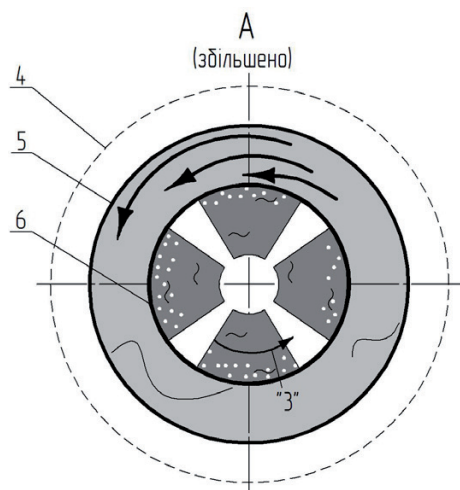


Рис. 5. Зони концентрації звукової енергії в площині кільця: темні сектори — підвищена зона турбулентності; світлі сектори — зони звукової тіні: «3» — локальний обмивний потік, 4 — акустичний фронт, 5 — корпус посудини, 6 — мідне кільце

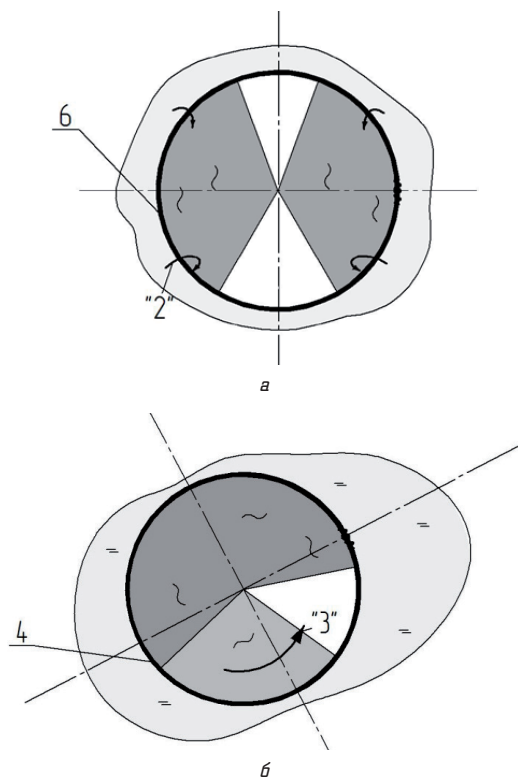


Рис. 6. Зони концентрації звукової енергії: а — мідне кільце займає вертикальне положення, де «2» — локальний обмивний потік, б — мідне кільце; б — площина кільця становить кут 45° з віссю посудини, де «3» — локальний обмивний потік, 4 — мідне кільце

З іншого боку, за умови, що площина кільця розташована під кут 45° до вісі посудини, утворюється лише одна, невелика за площиною, зона акустичної тіні у вигляді світлого центрального сектора. Інша, переважна за величиною внутрішня площа кільця інтенсивно турбулізується звуковими хвилями (рис. 6, б).

7. SWOT-аналіз результатів досліджень

Strengths. Аналіз результатів досліджень дозволяє розкрити зміст природи явища, що вивчається, починаючи з причин появи концентрації звукових хвиль в оточуючій рідині і формування поверхонь каустики, які виступають першопричиною виникнення потужного глобального рушійного потоку у вигляді висхідної спіралі і виявити наявність додаткових плинних потоків у внутрішньому просторі металевого кільця та обтікаючих кільце потоків. По-друге, виявити наявність усередині кільця зон турбулентності рідини і зон пасивної енергетики — зон акустичної тіні. Останні з'являються як результат інтерференції різних типів звукових хвиль. Головним досягненням експерименту слід вважати розкриття природи виникнення потужного рушійного потоку у вигляді циліндричної спіралі, який породжує високий рівень турбулентності оточуючої рідини і слугує проявам абераційних явищ випромінюваної у рідину звукових хвиль оболонки посудини.

Weaknesses. Поліагрегатна механічна система в акустичних полях породжує складну і неоднозначну динаміку усієї конструкції в цілому. Таким чином, має місце високий ступінь турбулентності рідини, який доповнюється ділянками концентрації звукової енергії у вигляді тривимірної турбулентності, та навпаки, зона енергетичної пасивності. Розподіл тієї та іншої зони має вигляд центрального сектора кільця.

Opportunities. Точно окреслене явище, що вивчається, надає можливість боротьби з негативним впливом зовнішніх збурюючих чинників пасивними, активними чи автокомпенсаційними методами.

Threats. Практика напівнатурних досліджень показує, що ефективними засобами негативного впливу проникаючого акустичного випромінювання можуть бути не тільки пасивні методи боротьби із звуковими хвилями. Логіка досліджень дає право дійти висновку, що не меншими, а може найбільш ефективними засобами боротьби з зонами концентрації звукової енергії, які виникають внаслідок резонансних явищ, постають теж резонансні методи, особливо в гіперзвукових технологіях. Прикладом може слугувати боротьба з негативним впливом плазми на радіотрансляючі антени літальних виробів, коли нагріта до 2000 °С плазма створює на антені екран, який на даний момент не може бути ефективно ліквідований відомими методами. Науковці КНР і США дійшли висновку та експериментально підтвердили, що ліквідувати негативний вплив плазми можна теж на резонансному рівні, завдяки добавкам в метал антени, які слугують індуктивністю системи антена-плазма. Настроюючи коливальний контр плазма-антена, можна ефективно боротися з екрануванням плазмою антени, що надає можливість використання в гіперзвукових технологіях безпілотних варіантів.

8. Висновки

1. Проведені напівнатурні дослідження стану зануреного в рідину мідного кільця доводять багатогранність впливу звукового проміння на стан усієї системи. Експериментально доведено формування глобального рушійного потоку під дією звукового проміння та локальних, менших за потужністю, плинних потоків.

2. З'ясовано, що аберація звукових хвиль, які випромінюються поздовжньою хвилею посудини в рідину, слугує концентрації звукової енергії, яка породжує висхідний потужний рушійний потік у вигляді циліндричної спіралі. Таким чином, має місце високий ступінь турбулентності рідини, який доповнюється ділянками концентрації звукової енергії, а також ділянками мінімального енергетичного стану у вигляді центральних колових секторів в площі металічного кільця. Як стверджує експеримент, поліагрегатна механічна система в акустичних полях породжує складну і неоднозначну динаміку усієї конструкції в цілому. З'ясовано присутність аберації звукових хвиль, що випромінюються в рідину, зон каустики, елементів концентрації звукового випромінювання та інтерференції звукових хвиль.

Література

1. Гладкий, В. Ф. Динамика конструкции летательного аппарата [Текст]: моногр. / В. Ф. Гладкий. — М.: Наука, 1969. — 496 с.
2. Мельник, В. Н. Возникновение резонанса в акустической среде подвеса поплавкового гироскопа [Текст] / В. Н. Мельник, В. В. Карачун // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2016. — № 1/7 (79). — С. 39–44. doi:10.15587/1729-4061.2016.59892
3. Karachun, V. The Additional Error of Inertial Sensors Induced by Hypersonic Flight Conditions [Text] / V. Karachun, V. Mel'nick, I. Korobiihchuk, M. Nowicki, R. Szewczyk, S. Kobzar // Sensors. — 2016. — Vol. 16, № 3. — P. 299. doi:10.3390/s16030299
4. Мельник, В. Н. Напряженно-деформированное состояние подвеса поплавкового гироскопа при акустическом нагружении [Текст] / В. Н. Мельник // Проблемы прочности. — 2007. — № 1. — С. 39–54.
5. Павловский, М. А. Теория гироскопов [Текст]: учеб. пособие / М. А. Павловский. — К.: Вища школа, 1986. — 303 с.
6. Фесенко, С. В. Дослідження особливостей поведінки циліндричної оболонки в ультразвуковому полі [Текст] / С. В. Фесенко, В. Ю. Шибельський // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси. — 2016. — № 3. — С. 61.
7. Лепоринская, Л. П. Выносливость авиационных конструкций при акустических нагрузках [Текст] / Л. П. Лепоринская // Выносливость авиационных конструкций при акустических нагрузках. — 1967. — № 218. — С. 317–325.
8. Вяльцев, В. В. Мощная низкочастотная звуковая сирена [Текст] / В. В. Вяльцев, В. Г. Хоргуани // Акустический журнал. — 1961. — Вып. 3, № 7. — С. 377–378.
9. Белый, Н. Г. Об акустическом нагружении фюзеляжа самолета ИЛ-18 и выносливости элементов его обшивки [Текст] / Н. Г. Белый, А. В. Пачандо // Прочность и долговечность авиационных конструкций. — 1965. — Вып. 11. — С. 4–57.
10. Даэр, И. Колебания корпуса космического аппарата под действием шума ракетных двигателей [Текст]: сб. науч. тр. / И. Даэр; под ред. С. Крендела // Случайные колебания. — М.: Мир, 1967. — С. 192–211.
11. Фокс Вильямс, Д. Е. Шум высокоскоростных ракет [Текст]: сб. науч. тр. / Д. Е. Фокс Вильямс; под ред. С. Крендела // Случайные колебания. — М.: Мир, 1967. — С. 45–49.
12. Гринченко, В. Т. Гармонические колебания и волны в упругих телах [Текст]: моногр. / В. Т. Гринченко, В. В. Мелешко. — К.: Наукова думка, 1981. — 283 с.
13. Валеев, К. Г. Определение напряженного состояния плоской панели в акустическом поле выхлопной струи [Текст] / К. Г. Валеев, В. Е. Квитка // Прикладная механика. — 1970. — Vol. VI, № 4. — С. 39–43.
14. Павловский, М. А. Об автокомпенсации погрешностей гироскопов при угловой вибрации основания [Текст] / М. А. Павловский, В. Е. Петренко // Доклады АН УССР. Серия А. — 1977. — № 8. — С. 81–84.
15. Nwe, T. T. Application of an Inertial Navigation System to the Quad-rotor UAV using MEMS Sensors [Text] / T. T. Nwe et al. // Engineering and Technology. — 2008. — Vol. 42. — P. 578–582.
16. Woodman, O. J. An introduction to inertial navigation [Text]: Monograph / O. J. Woodman. — Cambridge, 2007. — 37 p.
17. Le Manh Hung, V. Indoor Navigation System for Handheld Devices [Text]: Monograph / V. Le Manh Hung. — Worcester, 2009. — 198 p.
18. Nasiri, S. A. Critical Review of MEMS Gyroscopes Technology and Commercialization Status [Text]: Brochure / S. A. Nasiri. — California, 2004. — 8 p.

ДИФРАКЦИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ КОЛЬЦЕ

Проведен анализ результатов полунатурных испытаний медного кольца, погруженного в жидкость и подверженного влиянию внешнего звукового излучения. Раскрыта природа формирования в жидкости концентрации звуковых волн в виде поверхности каустики. Объяснены причины концентрации звуковых волн и возникновения глобального и локальных движущих потоков жидкости. Проанализировано энергетическое состояние жидкости внутри ограниченного кольцом пространства при разных направлениях действия звукового луча с плоским фронтом.

Ключевые слова: каустика, аберация, волновой размер, концентрация звуковых волн, движущий поток, дифракция.

Карачун Володимир Володимирович, доктор технічних наук, професор, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна.

Мельник Вікторія Миколаївна, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна, e-mail: vmm71@i.ua.

Фесенко Сергій Вікторович, аспірант, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Україна.

Карачун Владимир Владимирович, доктор технических наук, профессор, кафедра биотехники и инженерии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Украина.

Мельник Виктория Николаевна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой биотехники и инженерии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Украина.

Фесенко Сергей Викторович, аспирант, кафедра биотехники и инженерии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Украина.

Karachun Volodimir, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine.

Mel'nick Viktorij, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: vmm71@i.ua.

Fesenko Sergii, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine