

6. Maklennen, Dz., Chzhaohujej, T., Krivat, B. (2009). Microsoft SQL Server 2008: Data mining intelektual'nyj analiz dannyh. SPb.: BHV-Peterburg, 720.

7. Sedova, N. A. (2013). Formirovanie lingvisticheskikh peremennyh dlja zadach sudovozhdenija. Jekspluatacija morskogo transporta, 2 (72), 19–23.

8. Chernyi, S. G. (2014). Analiz pravil kombinirovanija gruppovyh jekspertnyh ocenok pri nechetkikh dannyh. Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii, 3.1 (57), 182–187.

9. Chernyi, S. G. (2012). Primenenie mehanizma informacionnyh intelektual'nyh modelej v sistemah avtomaticheskogo upravlenij. Vestnik Hersonskogo nacional'nogo tehniceskogo universiteta, 1 (44), 215–220.

10. Zhilenkov, A. A., Chernyi, S. G. (2014). Primenenie nejronechjotkogo modelirovanija dlja zadach identifikacii mnogokriterial'nosti v transportnoj otrasli. Vestnik samarskogo gosudarstvennogo universiteta putej i soobshhenij, 1 (23), 104–110.

Дата надходження рукопису 30.10.2014

**Доровской Владимир Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, кафедра электрооборудования судов и автоматизации производства, Керченский государственный морской технологический университет, ул. Орджоникидзе, 82, г. Керчь

E-mail: [dora\\_1943@mail.ru](mailto:dora_1943@mail.ru)

**Черный Сергей Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент, кафедра электрооборудования судов и автоматизации производства, Керченский государственный морской технологический университет, ул. Орджоникидзе, 82, г. Керчь

E-mail: [sergiiblack@gmail.com](mailto:sergiiblack@gmail.com)

**Доровская Ирина Александровна**, аспирант, кафедра информационных технологий, Херсонский национальный технический университет, ул. Бориславское шоссе, 24, г. Херсон, Украина, 28300

**Сметюх Надежда Павловна**, аспирант, кафедра электрооборудования судов и автоматизации производства, Керченский государственный морской технологический университет, ул. Орджоникидзе, 82, г. Керчь

E-mail: [golosa@mail.ru](mailto:golosa@mail.ru)

УДК 629.7.054

DOI: 10.15587/2313-8416.2014.29127

## РЕЗОНАНС СПІВПАДІННЯ І ПОХИБКИ ПОПЛАВКОВОГО ГІРОСКОПА

© В. В. Карачун, В. Ю. Шибецький

*Наведена модель явища появи додаткових похибок при взаємодії N-хвилі з приладами інерціального позиціонування гіперзвукових літальних апаратів. Розраховані кути співпадіння для датчика кутової швидкості. Дані розрахунків порівняні з експериментальними даними, отриманими при напівнатурних стендових дослідженнях для двох випадків, з працюючим і вимкненим гіроагрегатом. Зроблені висновки стосовно можливості використання отриманих результатів.*

*Ключові слова: гіперзвукові літальні апарати, N-хвиля, зона каустик, хвильове співпадіння, поплавковий гіроскоп.*

*The model of effects of additional errors in the interaction of N-wave with inertial positioning devices of hypersonic aircraft was created. The angles of coincidence to the angular velocity sensor were calculated. These calculations are compared with experimental data obtained in research of semi natural conditions for two cases of running and non-running gyro unit. Conclusions of possibility of results usage were made.*

*Keywords: hypersonic aircraft, N-wave, caustic zone, wave coincidence, floating gyroscope.*

### 1. Вступ

За висновками аналітиків, в найближчому майбутньому гіперзвукові технології будуть в змозі забезпечити захист стратегічних інтересів будь-якої країни, в світі.

Значення *гіперзвукових технологій* неможливо переоцінити. Бойовий гіперзвуковий літальний апарат (ЛА) отримує величезну тактичну перевагу над існуючими бойовими засобами, стаючи практично неуразливим для сучасних систем ППО [1]. Вже при швидкості 4 М гіперзвукова крилата ракета здатна перелетіти Атлантичний океан менш ніж за годину.

До недавнього часу, розробку і випробування гіперзвукових ЛА здійснювали лише дві країни – США і Росія. Відтепер, до перших двох приєдналася третя країна – Китай, із своїми гіперзвуковими технологіями. Випробування апарату, за твердженням китайських джерел, несе виключно наукове значення. Однак, в перспективі, на основі даної конструкції можуть бути створені крилаті ракети [2].

Незважаючи на те, що Китай не має такої тривалої історії створення гіперзвукових ЛА як США і Росія, проте його літальний апарат, за даними засобів масової інформації, вже долає швидкість у 10 М, і це при тому, що подібні ЛА в Росії рухаються зі швидкістю лише в 4,5 М, а в США – 5 М [3].

У світі стрімко зростає інтерес до освоєння активних гіперзвукових польотів в атмосфері. Однак роботи, що були розпочаті в Радянському союзі і США ще в 60-ті роки, так і не мають переконливого продовження. Причина тут не лише в фінансовій складовій. Найбільша складність криється в розв'язанні технічних завдань, що стикаються з величезною кількістю науково-технічних бар'єрів [4].

Масштабні дослідження гіперзвукових технологій здійснюються за п'ятьма магістральним напрямкам: *аеродинаміка; теплозахист; наведення; навігація і керування рухом; обладнання і двигуни.*

## 2. Постановка проблеми

В системах управління надзвуковою авіацією широке застосування знайшли, так звані, поплавкові гіроскопи, які конструктивно позбавлені основних недоліків «сухих» приладів, а саме значних за величиною (і, головне, змінних за знаком) моментів сил сухого тертя на вихідній осі, а також неприпустимо високої чутливості до ударних і вібраційних впливів, особливо небажаних для інтегруючих гіроскопів [5, 6]. Для ілюстрації впливу жорстких умов гіперзвукового польоту на гіроскопічні навігаційно-пілотажні прилади, оберемо за об'єкт дослідження конкретну технічну реалізацію серійно виготовляемого авіаційною промисловістю поплавкового приладу, що входить до складу бортової апаратури засобів тривалої дії.

З огляду на наджорсткі експлуатаційні умови гіперзвукового руху, надзвичайно **актуальними** постають задачі дослідження пружної взаємодії приладів інерціальної навігації з проникаючим акустичним випромінюванням, що має місце в процесі експлуатації і слугує причиною виникнення похибок позиціонування ЛА. Перш за все, це стосується ударної *N-хвилі*.

## 3. Літературний огляд

При взаємодії потужної ударної хвилі великої амплітуди (але невеликої частоти), з поплавковим підвісом, у вигляді класичного колового циліндра, в підвісі виникають пружні переміщення поверхні гіроскопа, що викликають похибки вимірювання (рис. 1, а) [1]. Для зменшення похибок доцільно змінити форму підвісу гіроскопа з класичного колового циліндра на катеноїдну або опуклу форму (рис. 1, б, в).

Але неможна забувати, що поплавковий гіроскоп містить важку рідину, яка може вносити свої корективи в поведінку гіроскопа.

Дослідження доводять, що за певних умов, корпус поплавкового гіроскопа може стати «акустично прозорим» і ударна *N-хвиля* практично без втрат пройде всередину приладу і призведе до різкого збільшення похибки вимірювань. Це явище можна назвати як просторовий (геометричний) резонанс, або як *хвильове співпадіння*. На частотах, вище за граничну, при певному куті співпадіння  $\theta_c$ , відповідному своїй частоті, згинна хвиля в корпусі приладу сформулює локальні особливості резонансного типу в підвісі, що послужить

виникненню Ейлерових сил інерції, які призведуть до різкого збільшення похибки вимірювань [7, 8].

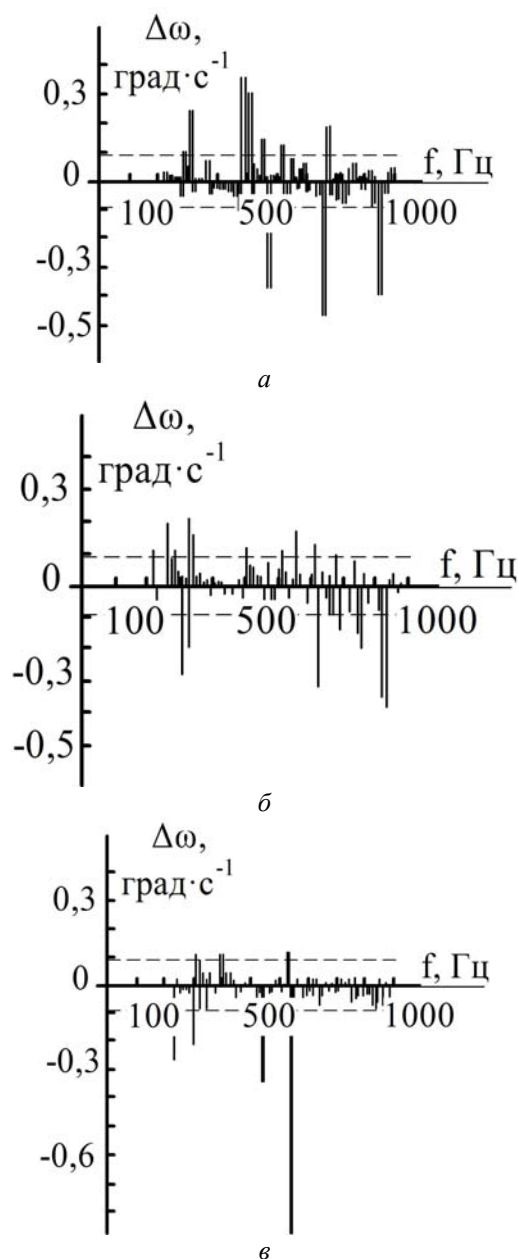


Рис. 1. Похибка ДУСУ в акустичному полі:  
а – класичний коловий циліндр; б – катеноїдна форма; в – опукла форма. Пунктирна лінія окреслює поріг чутливості приладу

В свою чергу, на частотах нижчих за граничну  $f_{sp}$ , окружна хвиля в корпусі також призведе до виникнення хвильового співпадіння, але при своєму куті співпадіння  $\theta'_c$ . Настане рівність сліду падаючої і окружної хвилі.

До речі, на низьких частотах, окружна хвиля може призвести до ще одного резонансу – коли слід довжини кола шпангоута і довжини генеруємої хвилі на площину фронту падаючої хвилі співпадуть. В цьому випадку корпус також стає «акустично прозорим» і акустичне випромінювання, що проходить всередину, також збільшить похибку вимірювань гіроскопа.

**4. Виникнення зон концентрації акустичної енергії в рідинно-статичній частині підвісу. Зони каустики**

В рідинно-статичній частині підвісу в експлуатаційних умовах можуть виникати зони концентрації енергії у вигляді конфокальних поверхонь та у вигляді плоских смуг. Це явище є наслідком інтерфераційних процесів. Вони набувають вигляду темних (акустична тінь) і світлих зон, які чередуються, проте не таких інтенсивних, як поверхні радіусу  $r_1$  і  $r_2$  [8].

Розрахункова модель, яка дає можливість розкрити природу цього процесу, будується в припущенні значного хвильового  $kR$  розміру корпусу, коли допустимо розглядати елементарну ділянку внутрішньої порожнини корпусу у вигляді пластини.

З метою наочності, прокоментуємо явище на середньому шпангоуті (рис. 2). Для спрощення, уявимо спочатку, що поплавок усередині відсутній. Таким чином, діючи іззовні на циліндричний корпус ДУСУ звукова хвиля  $P$ , буде генерувати в матеріалі *колові*, вздовж паралелі, пружні коливання  $U_\varphi(t, z, \varphi)$ , які поширюються в напрямку паралелі зі швидкістю  $V_{np}$ . Тобто, уздовж бічної поверхні корпусу. Крім того, спостерігаються згинні, *радіальні*, коливання  $W(t, z, \varphi)$  у площині шпангоута (в поперечній площині) зі швидкістю  $V_{nn}$ .

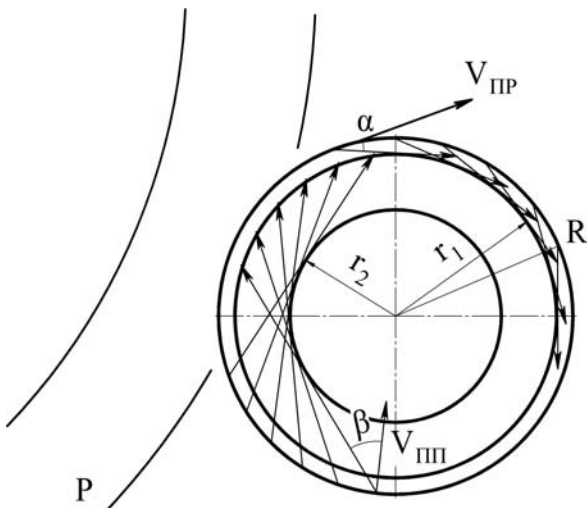


Рис. 2. Фокусування енергії акустичного випромінювання в оболонці з рідиною

*Колові хвилі.* Вважаючи бічну частину корпусу ДУСУ оболонкою великих хвильових розмірів, тобто такою, коли виявляється властивість  $kR \gg 1$  ( $k = \frac{\omega}{c}$  – хвильове число), припустимо розглядати окремо взятий коловий елемент її внутрішньої поверхні як пластину приблизно нульової кривизни, швидкість *поздовжніх* хвиль в якій співпадає з *коловою* швидкістю вздовж паралелі оболонки, тобто  $V_{np}$ .

Якщо швидкість *поздовжньої* хвилі  $V_{np}$  більше швидкості звуку  $c_0$  в рідині, тобто

$$V_{np} > c_0,$$

тоді хвиля, яка прямує уздовж паралелі, буде випромінювати в рідину звукову хвилю, причому напрямок її становить з вектором швидкості  $V_{np}$  кут  $\alpha$ , який визначається виразом (рис. 2):

$$\sin \alpha = \frac{c_0}{V_{np}}.$$

Внаслідок цього, значна частка енергії звукової хвилі буде зосереджуватися поблизу кола радіуса  $r_1$ .

Наприклад, якщо взяти для конкретності розмір внутрішнього радіуса корпусу ДУСУ рівним  $R = 2,5$  см, матеріал корпусу вважати алюмінієм ( $V_{np} = 6400 - 5200$  м/с,  $V_{nn} = 3080$  м/с), рідинно-статичний підвіс – гліцерином ( $c_0 = 1923$  м/с при  $t = 20^\circ C$ ), а звукове випромінювання частоти  $f = 42$  кГц, тоді, хвильовий розмір внутрішньої поверхні корпусу ДУСУ  $kR = \frac{\omega}{c_0} R = \frac{2\pi f}{c_0} R \approx 3,43$ , тобто достатньо більше 1. Отже  $\alpha = 21^\circ 40'$ .

Звідки (рис. 2):

$$r_1 = 2,32 \text{ (см)}.$$

З тієї ж причини, *поперечна* хвиля (згинна хвиля в радіальному напрямку) буде призводити до концентрації енергії поблизу кола радіуса  $r_2$ :

$$\sin \beta = \frac{c_0}{V_{nn}};$$

$$r_2 = 1,68 \text{ (см)}.$$

Радіус поплавка становить 2 см, тому, очевидно, що в приладі каустична поверхня радіуса  $r_2$  не буде проявлятися, а поверхня радіуса  $r_1$  – залишиться (рис. 3).

Каустична поверхня радіуса  $r_1$  чітко розмежує область акустичної тіні в рідинно-статичній частині підвісу.

Зрозуміло, що, обираючи відповідним чином матеріал корпусу і рідини, можна впливати на характер поверхні *зон каустик*. Зокрема, наприклад, зробити їх дискретно-неперервними [9].

Якщо скористатися методами променевої акустики, тоді можна класифікувати явище, що вивчається, як, свого роду, *аберацію* звукових хвиль. У безабераційних конструкціях, як відомо, каустична поверхня обертається на пряму лінію і, таким чином, в нашому випадку буде перебувати на поздовжній осі корпусу поплавкового гіроскопа [10, 11].

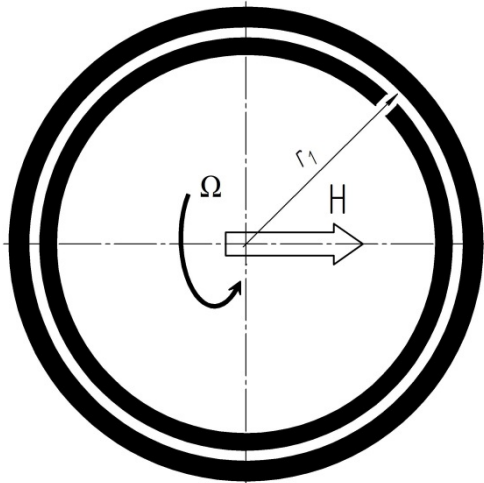


Рис. 3. Фокусування енергії проникаючого випромінювання в рідинностатичній частині поплавкового підвісу – світле коло

**5. Апробація результатів досліджень**

Порівняльний аналіз реалізацій вихідного сигналу датчика надає можливість, з одного боку, встановити ступінь впливу ультразвукового променя, власне, на поліагрегатний підвіс гіроскопа, а з іншого – визначити ступінь дії гіроскопічних моментів і Ейлерових сил інерції на похибку  $\Delta\omega$  вимірювань кутової швидкості літального апарату при гіперзвуковому польоті.

Чорним кольором на діаграмі вихідного сигналу датчика кутових швидкостей позначений “зсув нуля” приладу при вимкненому гіромоторі, коли  $\theta = 0^\circ$ . Сірим кольором представлений вихідний сигнал, коли напрям ультразвукового променя  $\theta = 10^\circ 37'$  (рис. 4).

При перпендикулярному падінні ультразвукового променя на оболонкову частину корпусу ( $\theta = 0^\circ$ ), як видно, підвіс практично не реагує на акустичне збурення. Вихідний сигнал можна вважати рівним нулю (рис. 4, чорний колір). Зовсім інша картина спостерігається при куті падіння ультразвукового променя  $\theta = 10^\circ 37'$ . Теоретичні розрахунки показують, що це відбувається за значенням кута падіння  $\theta = 10^\circ$ .

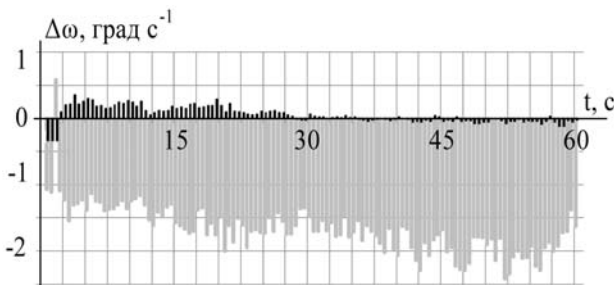


Рис. 4. Реакція підвісу гіроскопа на дію ультразвукового променя ( $\varphi = 0^\circ$ ): чорний колір –  $\theta = 0^\circ$ ; сірий колір –  $\theta = 10^\circ 37'$

Різниця між аналітичним визначенням кута співпадіння  $\theta_c$  і стендовими вимірюваннями складає

всього 37 кутових хвилин, що можна вважати цілком припустимим.

Реалізація вихідного сигналу ДУСУ показує, що в ньому присутня досить суттєва постійна складова (близько  $0,5 \text{ град } \text{с}^{-1}$ ) і стохастична складова (рис. 4). Причому, максимальне значення вихідного сигналу сягає  $0,6555 \text{ град } \text{с}^{-1}$ , що набагато перевищує порогове значення для приладу (для ДУСУ2-30В порогове значення становить  $0,45 \text{ град } \text{с}^{-1}$ ).

При ввімкненому гіромоторі, гіроскоп, привнесе суттєві зміни у вихідний сигнал приладу.

Так, для кутів падіння ультразвукового променя не рівних куту співпадіння  $\theta_c$ , вихідний сигнал лише трохи перевищує поріг чутливості (рис. 5). Навпаки, для кута співпадіння  $\theta_c$ , вихідний сигнал суттєво збільшується, досягаючи  $2,19 \text{ град } \text{с}^{-1}$ . Середня його величина становить  $1,6 \text{ град } \text{с}^{-1}$ . Причому, змінився і знак вихідного сигналу. Він складає  $1,6 \text{ град } \text{с}^{-1}$ . До речі, змінився і знак вихідного сигналу.

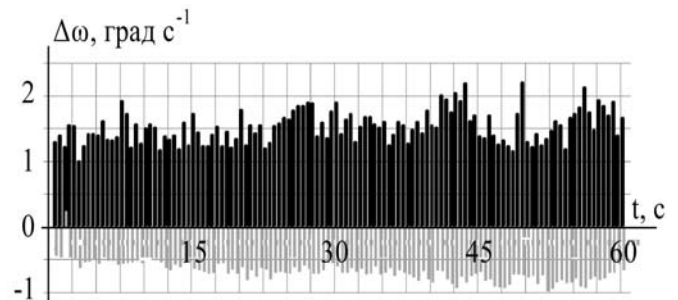


Рис. 5. Вихідний сигнал ДУСУ при  $\varphi = 0^\circ$ : сірий колір –  $\theta = 0^\circ$ ; чорний колір –  $\theta = 10^\circ 37'$

Очевидно, що на вихідний сигнал, крім самого підвісу, стала діяти також і гіроскопічна реакція. І її вплив настільки істотний, що ставить під сумнів працездатність приладу в даних умовах.

Тут можна розглядати кілька шляхів вирішення. Або розробити пасивні методи звукоізоляції приладу, або використовувати схемні рішення для усунення (або часткового зменшення) впливу на прилад ультразвукового випромінювання гіперзвукового польоту.

**6. Висновки**

Проведені напівнатурні стендові випробування датчика кутових швидкостей на функціональну спроможність в ультразвуковому полі при гіперзвуковому польоті надають можливість зробити певні висновки щодо відповідності характеристик паспортним вимогам:

- перше встановлено, що при експлуатації датчика ДУСУ2-30В зовнішній ультразвуковий промінь породжує додаткові похибки ДУСУ на резонансному рівні за наявності хвильового співпадіння, які за своєю величиною перевищують припустимі Паспортні значення;

- з’ясовано причину появи зон концентрації енергії акустичного променя (*zone kaustikos*) в рідинностатичному підвісі приладу і розраховано

радіуси зон каустик. Окреслені зони акустичної тіні в підвісі.

– побудовані розрахункові моделі дозволяють узагальнити отримані результати на інші об'єкти, що вимагають «акустичної прозорості» і «невидності» в пошуковому промені.

#### Література

1. Шибецкий, В. Ю. Поплавковый подвес гироскопа при летной эксплуатации [Текст] / В. Ю. Шибецкий, В. В. Карачун // Известия ГУАП. Аэрокосмическое приборостроение: науч. журнал. – 2013. – Вып. 4 – С. 41–44.
2. Гиперзвук: третий участник гонки [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://rus.ruvr.ru/2014\\_01\\_17/Giperzvuk-tretij-uchastnik-gonki-8178/](http://rus.ruvr.ru/2014_01_17/Giperzvuk-tretij-uchastnik-gonki-8178/) — 17.01.2014. — Заг. з екрану.
3. Совместный выход на «гиперзвук» [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://vpk-news.ru/articles/3901> — 15.04.2009. — Заг. з екрану.
4. Karachun, V. V. Influence of Diffraction Effects of the Inertial Sensors of a Gyroscopically Stabilized Platform: Three – Dimensional Problem [Text] / V. V. Karachun, V. N. Mel'nick // Int. Appl. Mech. – 2012. – Vol. 48, Issue 4. – P. 458–464. doi: 10.1007/s10778-012-0533-y
5. Карачун, В. В. Погрешности гироскопа, обусловленные развивающейся качкой фюзеляжа при летной эксплуатации [Текст] / В. В. Карачун, В. Н. Мельник, В. Ю. Шибецкий // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 5, № 7 (65). – С. 45–47. – Режим доступа: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18525/16289>
6. Шибецкий, В. Ю. Влияние гауссовой кривизны подвеса поплавкового гироскопа на упругую податливость в акустическом поле [Текст] / В. Ю. Шибецкий // Молодой ученый. Ежемесячный журнал: г. Чита, Россия. – 2012. – №12. – С. 116–120.
7. Кузьмичев, Ю. М. Возбуждение цилиндрической оболочки ультразвуком [Текст] / Ю. М. Кузьмичев, В. М. Макаров // Акуст. журнал. – 1958. – Т. IV., Вып. 3. – С. 282–283.
8. Макаров, В. И., Об излучении волн оболочками в звуковом поле [Текст] / В. И. Макаров, Н. А. Фадеев // Акуст. журнал. – 1960. – Т. IV., Вып. 2. – С. 261–263.
9. Патент № 66311 на корисну модель, Україна, МПК (2011) G01C19/20. Поплавковий гіроскоп [Текст] / В. В. Карачун, М. С. Тривайло, В. М. Мельник, О. С. Руденко. – U 201108294. – Заявл. 01.07.2011. – Опубл. 26.12.2011.

10. Шендеров, Е. Л. Волновые задачи гидроакустики [Текст] : моногр. / Е. Л. Шендеров. – ЛЭТИ. – Л. : Судостроение, 1972. – 352 с.

11. Заборов, В. И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций [Текст] : моногр. / В. И. Заборов. – Главгорстрой г. Минск. – М. : Стройиздат, 1962. – 116 с.

#### References

1. Shybetskii, V. Y., Karachun, V. V. (2013). Float suspension gyroscope under flight manual. Proceedings of the SAC. Aerospace Instrumentation: scientific. Magazine, 4, 41–44.
2. Hypersound: third party race. Available at: [http://rus.ruvr.ru/2014\\_01\\_17/Giperzvuk-tretij-uchastnik-gonki-8178/](http://rus.ruvr.ru/2014_01_17/Giperzvuk-tretij-uchastnik-gonki-8178/) (Last access: 17 January 2014).
3. Joint access to "hypersound". Available at: <http://vpk-news.ru/articles/3901/> (Last access: 15 April 2009).
4. Karachun, V. V., Mel'nick, V. N. (2012). Influence of Diffraction Effects on the Inertial Sensors of a Gyroscopically Stabilized Platform: Three –Dimensional Problem. International Applied Mechanics, 48 (4), 458–464. doi: 10.1007/s10778-012-0533-y
5. Karachun, V. V., Mel'nick, V. N., Shybetskii, V. Y. (2013). Gyro errors conditioned by developing pitching motion of fuselage during flight operations. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5/7(65), 45–47. Available at: <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/18525/16289>
6. Shybetskii, V. Y. (2012). Effect of Gaussian curvature suspension floating gyroscope on the elastic compliance in the acoustic field. Young scientist. Monthly magazine, 12, 116–120.
7. Kuz'michev, Y. M., Makarov, V. M. (1958). Excitation of a cylindrical shell with ultrasound. Acoust. magazine, 3, 282–283.
8. Makarov, V. I., Fadeev, N. A. (1960). On the radiation waves shells in the sound field. Acoust. magazine, 2, 261–263.
9. Tryvaylo, M. S., Karachun, V. V., Mel'nick, V. M., Rudenko, O. S. (2011). Float girooskop. Ukrainian Patent No. 66311, 26 December 2011
10. Shenderov, E. L. (1972). Wave of hydroacoustic. Leningrad, USSR: Shipbuilding, 352.
11. Zaborov, V. I. (1962). The theory of sound insulation walling. Moscow, USSR: Stroyizdat, 116.

Дата надходження рукопису 31.10.2014

**Карачун Володимир Володимирович**, професор, доктор технічних наук, кафедра біотехніки та інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056  
E-mail: [karachun11@i.ua](mailto:karachun11@i.ua)

**Шибецкий Владислав Юрійович**, асистент, кафедра біотехніки та інженерії, Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, Київ, Україна, 03056  
E-mail: [sjavva@mail.ru](mailto:sjavva@mail.ru)