

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ФЕСЕНКО СЕРГІЙ ВІКТОРОВИЧ

УДК 629.7.054:534.83

ДИСЕРТАЦІЯ
ВПЛИВ ПРОНИКАЮЧОГО АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ
НА ПОЛІАГРЕГАТНИЙ ПІДВІС ГІРОСКОПА І ПОХИБКИ
ВИМІРЮВАНЬ НА РЕЗОНАНСНОМУ РІВНІ

05.11.03 – Гіроскопи та навігаційні системи
Технічних наук

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

С.В. Фесенко

Науковий керівник

Карачун Володимир Володимирович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2017

АНОТАЦІЯ

Фесенко С.В. Вплив проникаючого акустичного випромінювання на поліагрегатний підвіс гіроскопа і похибки вимірювань на резонансному рівні.
– Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.11.03 «Гіроскопи і навігаційні системи» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2017.

У дисертаційній роботі отримано такі нові наукові результати:

1. Сформульовані принципи побудови розрахункових моделей пружної взаємодії проникаючого акустичного випромінювання з поліагрегатною системою поплавкового гіроскопа, окреслені умови виникнення чотирьох резонансів і чисельно прогнозовані величини параметрів поплавкового підвісу формуючих резонансну ситуацію.

2. Аналітично обґрунтована методика зменшення технологічних ризиків шляхом штучного формування зон каустики як буферної зони при вирішенні проблем точності вимірювань гіроскопа та комплексних задач функціонування рухомих об'єктів спеціального призначення.

3. Проаналізовані супутні явища в поліагрегатному підвісі гіроскопа за експлуатаційних умов – виникнення глобальних рушійних потоків в рідині підвісу, характер локальних плинних потоків, градієнт тепла в рідині.

4. Визначена структура виникаючих в підвісі зон каустики природного формування – у вигляді циліндричної поверхні конфокальної поверхні внутрішньої порожнини корпусу та у вигляді плоских радіальних поверхонь в площині шпангоута корпусу.

5. Чисельно окреслені величини похибок поплавкового гіроскопа на резонансному рівні хвильового співпадання – геометричного резонансу.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що: створено програмний продукт для обчислення звукопроникності корпусу

приладу, вплив співвідношення симетричної і антисиметричної складової імпедансу корпусу приладу; експериментально окреслені плоскі каустики в підвісі гіроскопа та зони в них підвищеного та помірного енергетичного стану; чисельно визначені умови прояву перших двох резонансів поплавкового підвісу за значної величини хвильового розміру корпусу; обчислені значення параметрів підвісу і напряму опромінювання ультразвуком, які формують третій резонанс у вигляді рівності сліду кола шпангоута і колової хвилі в корпусі на частотах нижчих за граничну f_{ep} ; чисельно означені межі інтенсивного впливу параметрів підвісу на рівні четвертого резонансу – комбінований резонанс; експериментально доведена можливість вирішення комплексних задач маскування об'єктів різного призначення зокрема оборонного за допомогою штучно сформованої поверхні каустики за допомогою додаткового опромінювання; за результатами напівнатурних випробувань доведена можливість частинного порушення примітності військових об'єктів а також екіпажу і умови забезпечення повного маскування об'єктів – танків у фортифікаційних спорудах відкритого типу, субмарин, тактичної палубної авіації, тощо.

Дисертаційна робота присвячена поглибленому вивченню природи виникнення зони каустики в поліагрегатному підвісі поплавкового гіроскопа, причини формування таких зон в підвісі, їх розвиток у часі і просторі і вплив на виникнення додаткових похибок поплавкового гіроскопа на резонансному рівні хвильового співпадання.

Побудовані розрахункові моделі пружної взаємодії проникаючого акустичного випромінювання з поліагрегатним підвісом серійно випускаемого авіаційною промисловістю двоступеневого гіроскопа класу ДУСУ2. Здійснено аналіз причин і ступеня прояву резонансних явищ при зміні та співвідношення симетричної та антисиметричної складової механічного імпедансу корпусу.

Наближену розрахункову модель побудовано з огляду на наявний великий хвильовий розмір $1 \ll kR$, що дозволяє спростити вихідні чинники в

аналітичній структурі явища, замінивши оболонкову частину корпусу на дискретно-неперервну сукупність тонких пластин нульової кривизни.

Вивчення явища за умови детального розгляду окремих частотних зон акустичного випромінювання – вищих за граничну $f_{gp} < f$ та нижчих за граничну $f < f_{gp}$, та наявної значної величини хвильового розміру корпусу приладу дозволили детально проаналізувати умови виникнення локальних особливостей підвісу гіроскопа в експлуатаційних умовах.

При невеликому антисиметричному імпедансі $Z_a \ll Z_c$ резонансні явища формуються згинними коливаннями корпусу і досягають своїх максимальних значень при кутах співпадання $\theta_c = 21^\circ 07'$, а при незначному симетричному імпедансі $Z_c \ll Z_a$ хвильове співпадання (геометричний резонанс) формується коловими хвилями при значеннях кута співпадання $\theta_c = 3^\circ 41'$. Лабораторні дослідження підтвердили адекватність розрахункової моделі реаліям експлуатаційних умов: кут співпадання для згинних коливань теоретичний – $\theta_c = 21^\circ 07'$, на експериментальній установці – $\theta_c = 18^\circ$, для колових хвиль на частотах нижче за граничну кут співпадання розрахунковий – $\theta_c = 3^\circ 41'$, на експериментальній установці – $\theta_c = 5^\circ$. Розходження розрахункових і експериментальних результатів знаходиться в припустимих межах відповідності.

Побудована уточнена розрахункова модель, для незначного хвильового розміру корпусу приладу, надала можливість додатково окреслити формування ще одного резонансу колових хвиль на частотах нижче за граничну $f < f_{gp}$ – за умови коли слід кола шпангоута корпусу на площину паралельною фронту плоскої хвилі дорівнює сліду колової хвилі. Експериментальним шляхом визначено найбільш небезпечне значення кута $\psi = 87^\circ 02'$ для частоти акустичного випромінювання $f = 40 \text{ кГц}$.

Створено програму обчислень звукопроникності корпусу в середовищі MathCad. Для чисельних характеристик серійного двостепенного

поплавкового гіроскопа класу ДУСУ2-30В експериментальним шляхом визначено наявність ще одного – комбінованого резонансу, коли звукопроникність корпусу стрімко збільшується внаслідок одночасного прояву параметрів хвильового співпадання θ та ψ . Результат обчислень можна розглядати як встановлені причини небажаного набуття певних значень кутів θ та ψ , що призводить до нескінченно малої дисипації енергії падаючої звукової хвилі і виникнення, внаслідок цього, явища “*акустичної прозорості*” корпусу, окреслюючи глибину технологічних ризиків експлуатаційних умов.

У дисертаційній роботі визначено технічну можливість штучного формування буферної зони для боротьби з негативним впливом проникаючого акустичного випромінювання на прилад ДУСУ2-30В. Структура буферної зони базується як антипод *zone kaustikos* у рідинній частині підвісу гіроскопа, приведено результати експериментальних досліджень ефективності штучної буферної зони для убезпечення приладу від негативного впливу проникаючого акустичного випромінювання в напівнатурних умовах. Поліагрегатний підвіс гіроскопа, охоплений співвісними циліндричними оболонками, які розділені рідиною, певним чином реагує на виникаючу вібрацію, і формує середній інтегральний зсув вихідного сигналу приладу $\beta_{zc} = 0,025 \text{ град} \cdot \text{с}^{-1}$, що відповідає середній похибці вимірювань $\Delta\omega_{cp} \approx 0,02473 \text{ град} \cdot \text{с}^{-1}$. Пропонуємо технічне рішення, як показують лабораторні дослідження постає ефективним засобом боротьби із впливом проникаючого акустичного випромінювання на поплавковий гіроскоп і зменшує додаткову похибку вимірювань приблизно в 10 разів.

Побудована розрахункова схема явища дає можливість коректувати поверхню *ZONE KAUSTIKOS* відповідним підбором фізичних властивостей рідини, хвильового розміру і ступеня наближення до резонансної ситуації у вигляді хвильового співпадання сліду колової хвилі втулки і сліду падаючої хвилі.

У роботі здійснено аналіз маловідомого явища утворення плоскої *каустики* в акустичному середовищі.

Дослідження елементарної частини оболонки внутрішньої порожнини корпусу ДУСУ2 у вигляді металевого кільця надали змогу практично довести наявність в рідинній складовій підвісу гіроскопа окрім циліндричної *zone kaustikos* ще і плоскої каустики в площині шпангоута корпусу. Особливістю плоскої каустики, як з'ясувалося, постає її структура у вигляді сукупності центральних секторів внутрішньої порожнини корпусу з різним рівнем енергетичної активності рідини – від статичного до турбулентного, що в котрий раз підтвердило не аби яку складність процесів в рідинній частині підвісу гіроскопа, що знаходиться в акустичному полі.

Проведені експериментальні дослідження довели що в замкнутому об'ємі порожнини корпусу при опроміненні має місце локальні і глобальні особливості руху рідини. Завдяки об'ємній нелінійності порожнини корпусу первинно-статичний стан рідини суттєво змінюється і набуває структуру потужного рушійного потоку у вигляді циркуляції, а також плинні локальні потоки значно меншої потужності. Установлений чинник стану рідини дозволяє ще глибше проаналізувати механізм появи додаткових похибок ДУСУ під дією акустичного випромінювання.

Експериментально доведена наявність висхідних теплових потоків у рідинній частині підвісу гіроскопа, які суттєво змінюють вихідний статичний стан та породжують градієнт тепла, який не може компенсуватися тепловим кожухом приладу, тому, що причиною є проникаюче усередину акустичне випромінювання. Експериментальні дослідження довели наявність температурного стрибка в рідинній складовій частині підвісу гіроскопа.

Визначено, що сукупність потужної циркуляції рідини під дією проникаючого акустичного випромінювання, а також породжений цією дією градієнт тепла і різної потужності висхідні теплові потоки неодмінно призводять до примусового руху поплавкового підвісу відносно вихідної осі, що опосередковано впливає на гіроскоп через виникаючий гіроскопічний

момент і призводить до виникнення додаткових похибок інерціального сенсора.

Виконано аналізу можливості розширення практичних задач комплексного використання *zone kaustikos* для потреб маскування рухомих об'єктів в цілому за одночасного зменшення додаткових похибок вимірювань поплавкового гіроскопа в експлуатаційних умовах.

Побудовані розрахункові моделі штучного формування буферних зон у вигляді *zone kaustikos* з метою оцінки ступеня їх ефективності для зменшення ризиків експлуатаційних технологій засобів оборони – маскування і обмеженої примітності в цілому, підвищення точності гіроскопічних сенсорів палубної авіації, засобів силової стабілізації баштових гармат танків, ступеня маскування субмарин від глибоководного бомбометання та деякі інші.

Ключові слова: зона каустики, кут співпадання, резонанс, буферна зона, маскування, обмежена примітність.

Список основних публікацій здобувача:

1. Карачун В.В. Дифракція звукових хвиль на металевому кільці / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко // «Технологічний аудит та резерви виробництва». – 2016. – №6/2 (32). – С. 4-9.

2. Karachun V. Reduction of technological risks of flight operation by artificial formation of the buffer zone to penetrating acoustic radiation / V. Karachun, V. Mel'nick, S. Fesenko // «Technology audit and production reserves». – 2017. – №4/1 (36). – Р. 19-24.

3. Мельник В.М. Штучне формування зон активної турбулентності звуковими хвилями / В.М. Мельник, В.В. Карачун, С.В. Фесенко // «Міжнародний науковий журнал». – 2016. – №11 (21). – Т.1. – С. 85-89.

4. Шибецкий В.Ю. Формирование энергетической активности высокочастотными акустическими полями / В.Ю. Шибецкий, С.В. Фесенко // «Міжнародний науковий журнал». – 2016. – №11 (21). – Т.1. – С. 108-110.

5. Карачун В.В. Забезпечення скритної дислокації танка у фортифікаційних спорудах відкритого типу / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко // Scientific Journal «ScienceRise». – 2017. – №4 (33). – С. 31-36.

6. Карачун В.В. Аналіз технічної можливості маскуванню субмарини від засобів пеленгації / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко // «Технологічний аудит та резерви виробництва». – 2017. – №3/2 (35). – С. 28-32.

7. Карачун В.В. Дифракция звуковых волн на перекрестном упругом шарнире подвеса гироскопа / В.В. Карачун, С.В. Фесенко // «Авиационно-космическая техника и технология». – 2017. – №7 (142). – С. 112-122.

8. Патент України на винахід № 110911, МПК:G01C19/20. Поплавковий гіроскоп / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко. заявл. 14.05.2015; опубл. 25.02.2016, Бюл № 4/2016. – 4 с.

9. Патент України на винахід № 114459, МПК: G01C19/20. Поплавковий гіроскоп, захищений від зон каустики / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко. заявл. 23.05.2016; опубл. 12.06.2017, Бюл № 11/2017. – 7 с.

10. Фесенко С.В. Дослідження особливостей поведінки циліндричної оболонки в ультразвуковому полі / С.В. Фесенко, В.Ю. Шибєцький // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2016): Дев'ята Міжнар. наук.-практ. конф., 17-18 травня 2016 р., Київ, Україна. – К. НАУ. – 2016. – С. 61.

11. Karachun V.V. The nature of resonance features in the suspension of the gyroscope due to diffraction effects / V.V. Karachun, N.V. Ladogubets, S.V. Fesenko // THE SEVENTH WORLD CONGRESS “AVIATION IN THE XXI-st CENTURY” Safety in Aviation and Space Technologies, 19-21 September 2016, Kyiv, Ukraine. – Kyiv. NAU. – 2016. – P. 3.6.16.

12. Фесенко С.В. Встановлення особливостей виникнення систематичної похибки вимірювань ДУСУ в полі дії ультразвукового випромінювання / С.В. Фесенко, В.Ю. Шибєцький // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні

комплекси (ІРТК-2017): Десята Міжнар. наук.-практ. конф., 16-17 травня 2017 р., Київ, Україна. – К. НАУ. – 2017. – С. 61.

SUMMARY

Fesenko S.V. Influence of penetrating acoustic radiation on the polyaggregate suspension of the gyroscope and measurement error at the resonance level. – Qualifying scientific work, the manuscript.

Thesis for a candidate degree (PhD) in specialty 05.11.03 "Gyroscopes and navigation systems". – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, 2017.

In the thesis the following new scientific results are received:

1. The principles of constructing calculation models of elastic interaction of penetrating acoustic radiation with a polyaggregate system of a float gyroscope are formulated, the conditions of the occurrence of four resonances and the numerically predicted values of the parameters of the floating suspension forming the resonance situation are outlined.

2. Analytically grounded method of reducing technological risks by artificially forming zones of caustic as a buffer zone in solving problems of accuracy of measurements of a gyroscope and complex tasks of functioning of mobile objects of special purpose.

3. Associated phenomena are analyzed in the polyaggregate suspension of the gyroscope under operating conditions - the emergence of global motive flows in the suspension fluid, the nature of local flow streams, gradient of heat in the liquid.

4. The structure of the naturally occurring caustic zones originating in the suspension is determined in the form of a cylindrical surface of the confocal surface of the inner cavity of the body and in the form of flat radial surfaces in the plane of the shell housing.

5. Numerically determined values of errors of float gyroscope at the resonance level of wave coincidence - geometric resonance.

The practical significance of thesis results are that: A software product was created for calculating the permeability of the device body, the effect of the ratio of the symmetric and antisymmetric component of the device's impedance component; experimentally plotted flat caustics in the suspension of the gyroscope and zones in them of elevated and moderate energy status; numerically determined conditions for the manifestation of the first two resonances of the float suspension for a significant value of the wave size of the case; the calculated values of the parameters of the suspension and direction of irradiation by ultrasound, which form the third resonance in the form of the equality of the trace of the circle of the shank and the circular wave in the body at frequencies below the limit f_{ep} ; numerically defined limits of intensive influence of suspension parameters at the level of the fourth resonance - combined resonance; experimentally proved the possibility of solving complex problems of masking objects of various purposes, in particular defensive by means of artificially formed surface of caustic with the help of additional irradiation; on the results of half-level tests proved the possibility of partial violation of the remnant of military objects and crew and the conditions for full masking objects - tanks in open-type fortifications, submarines, tactical deck aircraft, etc.

The dissertation is devoted to the penetrating study of the nature of the occurrence of the caustic zone in the polyaggregate suspension of the float gyroscope, the reasons for the formation of such zones in the suspension, and their development in time and space and the effect on the occurrence of additional errors floating gyroscope on the resonance wave coincidence level.

Calculated models of elastic interaction of penetrating acoustic radiation with polyaggregate hanging by the aviation industry of the two-stage gyroscope class DUSU2 are produced. The analysis of causes and degree of manifestation of resonance phenomena at the change and correlation of the symmetric and antisymmetric component of the mechanical impedance of the body are analyzed.

An approximate calculation model is constructed based on the available large wave size $1 \ll kR$, which simplifies the initial factors in the analytical structure of

the phenomenon, replacing the shell part of the body with a discrete-continuous set of thin plates of zero curvature.

The study of the phenomenon, subject to a detailed examination of the individual frequency zones of acoustic radiation - higher than the marginal $f_{zp} < f$ and lower than the limit $f < f_{zp}$, and the present significant value of the wave size of the device case, allowed to analyze in detail the conditions of occurrence of local features of the suspension of the gyroscope under operating conditions.

With a small antisymmetric impedance $Z_a \ll Z_c$, the resonance phenomena are formed by bending oscillations of the housing and reaching their maximum values at the corners of the coincidence $\theta_c = 21^\circ 07'$, and with a slight symmetric impedance $Z_c \ll Z_a$, the wave coincidence (geometric resonance) is formed by circular waves at values of the angle of coincidence $\theta_c = 3^\circ 41'$. Laboratory studies have confirmed the adequacy of the calculation model with the realities of operating conditions: coincidence angle for bending oscillations is theoretical – $\theta_c = 21^\circ 07'$, on an experimental installation – $\theta_c = 18^\circ$, for circular waves at frequencies below the boundary angle of the matching curve – $\theta_c = 3^\circ 41'$, on an experimental installation – $\theta_c = 5^\circ$. The difference between calculated and experimental results is within the permissible limits of compliance.

A refined calculation model for a small wave size of the device body was constructed, which provided an opportunity to further elaborate the formation of another resonance of the coil waves at frequencies below the boundary $f < f_{zp}$ – provided that the circumference of the shell housing on the plane parallel to the front of the plane wave is equal to the track of the coil wave. Experimental way is determined the most dangerous angle value $\psi = 87^\circ 02'$ for the frequency of acoustic radiation $f = 40 \text{ kHz}$.

A program for calculating the sound permeability of the enclosure in the MathCad environment was created. For the numerical characteristics of a serial two-stage float gyroscope class DUSU2-30V experimentally determined the

presence of one more - combined resonance, when the sound-permeability of the case is rapidly increasing due to the simultaneous manifestation of the parameters of the wave coincidence θ and ψ . The result of the calculations can be considered as established causes of undesired acquisition of certain values of angles θ and ψ , which leads to an infinitely small dissipation of the energy of the incident sound wave and the consequence of the phenomenon of "*acoustic transparency*" of the case, which outlines the depth of technological risks of operating conditions.

In the dissertation the technical possibility of artificial formation of a buffer zone for the control of the negative influence of penetrating acoustic radiation on the device DUSU2-30V is determined.

The structure of the buffer zone is based on the antipode *zone kaustikos* in the liquid part of the gyro suspension, the results of experimental studies of the effectiveness of the artificial buffer zone are provided for the safety of the device from the negative influence of penetrating acoustic radiation in the semiturn conditions. The polyaggregate suspension of the gyroscope, covered by coaxial cylindrical shells, which are separated by a liquid, in a certain way, reacts to the resulting vibration, and forms the average integral offset of the output signal of the device $\beta_{3c} = 0,025 \text{ deg} \cdot \text{s}^{-1}$, which corresponds to the average measurement error $\Delta\omega_{cp} \approx 0,02473 \text{ deg s}^{-1}$. Proposed technical solution, as laboratory studies show, is an effective means of controlling the influence of penetrating acoustic radiation on a float gyroscope and reduces an additional measurement error by approximately 10 times.

The constructed scheme of the phenomenon makes it possible to correct the surface of ZONE KAUSTIKOS by selecting the physical properties of the liquid, the wave size and the degree of approaching the resonant situation in the form of a wave coincidence of the trace of the coil wave of the sleeve and the trace of the incident wave.

In the thesis an analysis of the little-known phenomenon of the formation of flat *caustic* in the acoustic environment.

Investigation of the elemental part of the shell of the inner cavity of the body DUSU2 in the form of a metal ring made it possible to practically prove the presence in the liquid component of the suspension of the gyroscope, in addition to the cylindrical *zone kaustikos*, and also the flat caustic in the plane of the shell housing. As a feature of the flat caustic, as it turned out, its structure appears as a set of central sectors of the inner cavity of the body with different levels of energy activity of the liquid - from static to turbulent, which in some cases has confirmed not to any complexity of processes in the liquid part of the suspension of the gyroscope located in the acoustic field.

The conducted experimental researches have proved that in the closed volume of the cavity of the case under irradiation there are local and global features of the motion of the liquid. Due to the volumetric nonlinearity of the cavity of the body, the primary-static state of the fluid substantially changes and acquires the structure of a powerful moving flow in the form of circulation, as well as flowing local flows of significantly less power. The established factor of the state of the liquid allows you to analyze even deeper the mechanism of the appearance of additional errors DUSU under the action of acoustic radiation.

Experimentally proved the presence of upward heat flows in the liquid part of the gyros suspension, which significantly change the initial static state and generate a gradient of heat that can not be compensated by the thermal casing of the device, because the cause is penetrating into acoustic radiation. Experimental studies have shown the presence of a temperature jump in the liquid component of the gyroscope suspension.

It is determined that the combination of a strong circulation of the liquid under the influence of penetrating acoustic radiation, as well as the generated heat gradient generated by this action and different power, ascending thermal flows necessarily lead to the forced movement of the floating suspension relative to the original axis, which indirectly affects the gyroscope due to the emerging gyroscopic moment and leads to the emergence additional errors of the inertial sensor.

The analysis of the possibility of expanding the practical tasks of the integrated use of *zone kaustikos* for the needs of masking of moving objects in general while simultaneously reducing additional errors of measurements of the float gyroscope under operating conditions is made.

Calculated models of artificial formation of buffer zones in the form of *zone kaustikos* with the purpose of assessing the degree of their efficiency to reduce the risks of operational technologies of defense means - masking and limited obscenity in general, increasing the accuracy of gyroscopic sensors deck aviation, means of power stabilization of tower cannons, the degree of masking of submarines from deep bombing and some others.

Keywords: caustic zone, angle of coincidence, resonance, buffer zone, disguise, limited perceptibility.

List of main publications of the applicant:

1. Карачун В.В. Дифракція звукових хвиль на металевому кільці / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко // «Технологічний аудит та резерви виробництва». – 2016. – №6/2 (32). – С. 4-9.

2. Karachun V. Reduction of technological risks of flight operation by artificial formation of the buffer zone to penetrating acoustic radiation / V. Karachun, V. Mel'nick, S. Fesenko // «Technology audit and production reserves». – 2017. – №4/1 (36). – P. 19-24.

3. Мельник В.М. Штучне формування зон активної турбулентності звуковими хвилями / В.М. Мельник, В.В. Карачун, С.В. Фесенко // «Міжнародний науковий журнал». – 2016. – №11 (21). – Т.1. – С. 85-89.

4. Шибецкий В.Ю. Формирование энергетической активности высокочастотными акустическими полями / В.Ю. Шибецкий, С.В. Фесенко // «Міжнародний науковий журнал». – 2016. – №11 (21). – Т.1. – С. 108-110.

5. Карачун В.В. Забезпечення скритної дислокації танка у фортифікаційних спорудах відкритого типу / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко // Scientific Journal «ScienceRise». – 2017. – №4 (33). – С. 31-36.

6. Карачун В.В. Аналіз технічної можливості маскування субмарини від засобів пеленгації / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко // «Технологічний аудит та резерви виробництва». – 2017. – №3/2 (35). – С. 28-32.

7. Карачун В.В. Дифракция звуковых волн на перекрестном упругом шарнире подвеса гироскопа / В.В. Карачун, С.В. Фесенко // «Авиационно-космическая техника и технология». – 2017. – №7 (142). – С. 112-122.

8. Патент України на винахід № 110911, МПК:G01C19/20. Поплавковий гіроскоп / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко. заявл. 14.05.2015; опубл. 25.02.2016, Бюл № 4/2016. – 4 с.

9. Патент України на винахід № 114459, МПК: G01C19/20. Поплавковий гіроскоп, захищений від зон каустики / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко. заявл. 23.05.2016; опубл. 12.06.2017, Бюл № 11/2017. – 7 с.

10. Фесенко С.В. Дослідження особливостей поведінки циліндричної оболонки в ультразвуковому полі / С.В. Фесенко, В.Ю. Шибецький // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2016): Дев'ята Міжнар. наук.-практ. конф., 17-18 травня 2016 р., Київ, Україна. – К. НАУ. – 2016. – С. 61.

11. Karachun V.V. The nature of resonance features in the suspension of the gyroscope due to diffraction effects / V.V. Karachun, N.V. Ladogubets, S.V. Fesenko // THE SEVENTH WORLD CONGRESS “AVIATION IN THE XXI-st CENTURY” Safety in Aviation and Space Technologies, 19-21 September 2016, Kyiv, Ukraine. – Kyiv. NAU. – 2016. – P. 3.6.16.

12. Фесенко С.В. Встановлення особливостей виникнення систематичної похибки вимірювань ДУСУ в полі дії ультразвукового випромінювання / С.В. Фесенко, В.Ю. Шибецький // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2017): Десята Міжнар. наук.-практ. конф., 16-17 травня 2017 р., Київ, Україна. – К. НАУ. – 2017. – С. 61.

ЗМІСТ

	Ст.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	24
ВСТУП	25
АНАЛІЗ СТАНУ ВИВЧАЄМОЇ ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	38
 РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ РИЗИКИ І ПОХИБКИ ПОПЛАВКОВОГО ГІРОСКОПА В АКУСТИЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ НАТУРНИХ УМОВ НА РЕЗОНАНСНОМУ РІВНІ	 43
1.1. Побудова розрахункової моделі пружної взаємодії корпусу ДУСУ2 з проникаючим акустичним випромінюванням. Хвильовий розмір корпусу приладу суттєво перевищує одиницю ($1 \ll kR$).....	44
1.1.1. Симетричний імпеданс набагато менше від антисиметричного, $Z_c \ll Z_a$	48
1.1.2. Антисиметричний імпеданс значно менший за симетричний імпеданс, $Z_a \ll Z_c$	49
1.2. Виникнення і розвиток резонансної ситуація в підвісі гіроскопа при зміні кута падіння акустичного променя ψ між поздовжньою віссю корпусу і хвильовим вектором.....	55
1.3. Умови формування комбінованого резонансу в підвісі гіроскопа.....	62
Висновки до розділу 1.....	70
 РОЗДІЛ 2. БУФЕРНА ЗОНА. ШТУЧНА ДИСИПАЦІЯ ЕНЕРГІЇ ПРОНИКАЮЧОГО АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	 72
2.1. Методи і засоби звуко- і віброізоляції бортової апаратури...	72
2.2. Технічна реалізація буферної зони для поплавкового гіроскопа.....	79
2.2.1. Дифракція звукових хвиль на підвісі гіроскопа...	79

2.2.2.	Напівнатурне дослідження дії проникаючого акустичного випромінювання.....	80
2.2.3.	Аналіз стану вивчаємої проблеми.....	80
2.2.4.	Обладнання та методи дослідження.....	82
2.2.5.	Напівнатурні дослідження промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2 убезпеченого буферною зоною.....	83
2.2.6	Аналіз результатів досліджень.....	88
Висновки до розділу 2.....		91
РОЗДІЛ 3. ДИФРАКЦІЯ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ НА ПІДВІСІ		
ГІРОСКОПА. ПЛОСКА <i>KAUSTIKOS</i>		92
3.1.	Дифракція звукових хвиль на металевому кільці. Рушійні потоки в рідині та плинні потоки у внутрішньому просторі кільця.....	92
3.1.1.	Експериментальне визначення плоскої каустики в металевому кільці під дією проникаючого акустичного випромінювання.....	93
3.1.2.	Виникнення зон активної і пасивної енергетики плоскої каустики.....	93
3.1.3.	Аналіз стану досліджуваної проблеми.....	94
3.1.4.	Лабораторний стенд для вивчення явища дифракції звукових хвиль на кільці корпусу приладу.....	96
3.1.5.	Результати напівнатурних випробувань.....	97
3.1.6.	Аналіз результатів досліджень.....	102
3.2.	Двошаровий підвіс поплавкового гіроскопа.....	104
3.3.	Поплавковий гіроскоп убезпечений від виникнення зон каустики.....	111
3.4.	Компенсація впливу градієнту тепла рідинностатичної частини підвісу пасивними методами.....	119

Висновки до розділу 3	124
РОЗДІЛ 4. КОМПЛЕКСНІ ЗАДАЧІ ВИКОРИСТАННЯ ZONE	
KAUSTIKOS НА РЕЗОНАНСНОМУ РІВНІ ХВИЛЬОВОГО	
СПІВПАДАННЯ	126
4.1. Відкриті фортифікаційні споруди у вигляді окопа для танка з обмеженим сектором обстрілу.....	126
4.1.1. Штучне формування <i>zone kaustikos</i> в оболонковому модулі фортифікаційної споруди відкритого типу.....	127
4.1.2. Напівнатурні експериментальні дослідження ступеня маскування і обмеженої примітності вогневих засобів та екіпажу танку.....	127
4.1.3. Аналіз стану вивчаємої проблеми.....	127
4.1.4. Лабораторний стенд для вивчення явища штучного формування огорожувальної поверхні.....	131
4.1.5. Результати напівнатурних випробувань.....	133
4.1.6. Аналіз результатів досліджень.....	135
4.2. Стратегічна бомбардувальна та тактична палубна авіація...	136
4.2.1. Маскування палубної авіації від засобів пеленгації повітряної розвідки.....	138
4.2.2. Укриття льотних виробів подвійною оболонкою з конфокальною <i>zone kaustikos</i>	138
4.2.3. Аналіз стану вивчаємої проблеми.....	139
4.2.4. Матеріали та методи дослідження.....	141
4.2.5. Результати напівнатурних випробувань	141
4.2.6. Аналіз результатів досліджень.....	144
4.3. Маскування субмарини від засобів пеленгації	145
4.3.1. <i>Zone kaustikos</i> як укриття для човнів підводного флоту.....	147
4.3.2. Об'ємна нелінійність подвійної оболонки	

заповненої рідиною для вирішення задач маскування і обмеженої примітності підводних човнів.....	148
4.3.3. Аналіз стану вивчаємої проблеми.....	148
4.3.4. Матеріали та методи дослідження.....	152
4.3.5. Результати напівнатурних випробувань.....	152
4.3.6. Аналіз результатів досліджень.....	155
Висновки до розділу 4.....	156
ВИСНОВКИ	158
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	160
ДОДАТКИ.....	172
Додаток А	
Акт про використання результатів дисертаційної роботи на етапі проектування дослідних зразків виробів.....	173
Додаток Б-1	
Програма обчислень звукопроникності елементів корпусу поплавкового гіроскопа класу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя.....	174
Додаток Б-2	
Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя за частоти акустичного випромінювання $f = 35 \cdot 10^3 \text{ Гц}$	175
Додаток Б-3	
Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя за частоти акустичного випромінювання $f = 36 \cdot 10^3 \text{ Гц}$	177
Додаток Б-4	
Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя за частоти акустичного випромінювання $f = 37 \cdot 10^3 \text{ Гц}$	179
Додаток Б-5	
Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя за частоти акустичного випромінювання $f = 38 \cdot 10^3 \text{ Гц}$	181

Додаток Б-6

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя за частоти акустичного випромінювання $f = 39 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ 183

Додаток Б-7

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя за частоти акустичного випромінювання $f = 40 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ 185

Додаток Б-8

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя за частоти акустичного випромінювання $f = 41 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ 187

Додаток Б-9

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя за частоти акустичного випромінювання $f = 42 \cdot 10^3 \text{ Гц}$ 189

Додаток Б-10

Програма обчислень резонансних значень кута ψ для колової хвилі; резонансні значення кута ψ для колової хвилі..... 191

Додаток Б-11

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 550 \text{ Гц}$, $\psi = 50,1^\circ$ 202

Додаток Б-12

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 750 \text{ Гц}$, $\psi = 55,8^\circ$ 205

Додаток Б-13

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 900 \text{ Гц}$, $\psi = 60^\circ$ 208

Додаток Б-14

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута

співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 1400 \text{ Гц}$, $\psi = 75,3^\circ$	211
--	-----

Додаток Б-15

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 47000 \text{ Гц}$, $\psi = 45^\circ$	214
---	-----

Додаток Б-16

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 53000 \text{ Гц}$, $\psi = 41,8^\circ$	214
---	-----

Додаток Б-17

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 53500 \text{ Гц}$, $\psi = 40,1^\circ$	219
---	-----

Додаток В-1

Зовнішній вигляд експериментального стенду для проведення напівнатурних досліджень промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2.....	223
--	-----

Додаток В-2

Напівнатурні випробування промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2-30В в полі дії акустичного випромінювання: $\varphi = 0^\circ$, без буферної зони, з буферною зоною.....	224
--	-----

Додаток В-3

Напівнатурні випробування промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2-30В в полі дії акустичного випромінювання: $\varphi = 45^\circ$, без буферної зони, з буферною зоною.....	227
---	-----

Додаток В-4

Напівнатурні випробування промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2-30В в полі дії акустичного випромінювання: $\varphi = 90^\circ$, без буферної зони, з буферною зоною.....	230
---	-----

Додаток В-5

Напівнатурні випробування промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2-30В в полі дії акустичного випромінювання: $\varphi = 135^\circ$, без буферної зони, з буферною зоною..... 233

Додаток В-6

Напівнатурні випробування промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2-30В в полі дії акустичного випромінювання: $\varphi = 180^\circ$, без буферної зони, з буферною зоною..... 236

Додаток В-7

Напівнатурні випробування промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2-30В в полі дії акустичного випромінювання: $\varphi = 225^\circ$, без буферної зони, з буферною зоною..... 239

Додаток В-8

Напівнатурні випробування промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2-30В в полі дії акустичного випромінювання: $\varphi = 270^\circ$, без буферної зони, з буферною зоною..... 242

Додаток В-9

Напівнатурні випробування промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2-30В в полі дії акустичного випромінювання: $\varphi = 315^\circ$, без буферної зони, з буферною зоною..... 245

Додаток Д-1

Зовнішній вигляд робочого місця для проведення стендових напівнатурних досліджень..... 248

Додаток Е-1

Процес зникнення зображення макета *танка* під дією ультразвукового випромінювання при наближенні до зони хвильового співпадання..... 249

Додаток Е-2

Процес зникнення зображення макетів *обслуговуючих військову техніку людей* під дією ультразвукового випромінювання при наближенні до зони хвильового співпадання..... 251

Додаток Е-3

Процес зникнення зображення макета <i>літака тактичної палубної авіації</i> під дією ультразвукового випромінювання при наближенні до зони хвильового співпадання.....	253
--	-----

Додаток Е-4

Процес зникнення зображення макета <i>субмарини</i> під дією ультразвукового випромінювання при наближенні до зони хвильового співпадання.....	255
--	-----

Додаток Ж

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	257
--	-----

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

c – швидкість звуку в рідинній частині підвісу

$\vec{k}$ – хвильовий вектор

ЛА – літальний апарат

ПГ – поплавковий гіроскоп

θ – кут падіння ультразвукового променя

θ_c – кут співпадання

ψ – кут співпадання для поздовжньої хвилі

β_{zc} – зсув нуля приладу в акустичному полі

$\Delta\omega$ – додаткова похибка в акустичному полі

КА – космічний апарат

БПЛА – безпілотні літальні апарати

ТПА – Тактична палубна авіація

СБА – Стратегічна бомбардувальна авіація

ДУСУ – датчик кутових швидкостей уніфікований

РН – ракета-носій

ВСТУП

Флуктуації тиску повітряного середовища дуже часто виявляються причиною коливань корпусу льотних виробів і викликають, судячи з усього більшу частину нерегулярних вібрацій фюзеляжу. Випадкові пульсації через нестабільність потоку повітря містять області, викликають інтенсивні пульсації тиску поблизу корпусу льотних виробів.

Під дією акустичних тисків, хвилі переміщуються з місцевою швидкістю звуку відносно навколишнього середовища. Однак, внаслідок руху льотних виробів, швидкість хвиль тиску на поверхні буде визначатися вже сумою місцевої швидкості звуку і швидкості польоту літального апарату. І оскільки остання сильно змінюється, а звукові хвилі підходять до льотного виробу під різними кутами, стає очевидним, що швидкість переміщення хвиль тиску відносно корпусу льотного виробу може приймати безліч значень.

Охарактеризуємо коротко причину виникнення на поверхні льотного виробу пульсацій тиску з позицій загальної теорії генерування звукового поля нестійким аеродинамічним потоком. Теорія пульсацій тиску бере свій початок з двох класичних робіт M.J. Lighthill's про звук, генерований в аеродинамічному потоці [1, 2]. У них зазначається, що в натурних умовах звук акустично еквівалентний звуку, що генерується в ідеальному середовищі системою розподілених джерел, квадруполів [3].

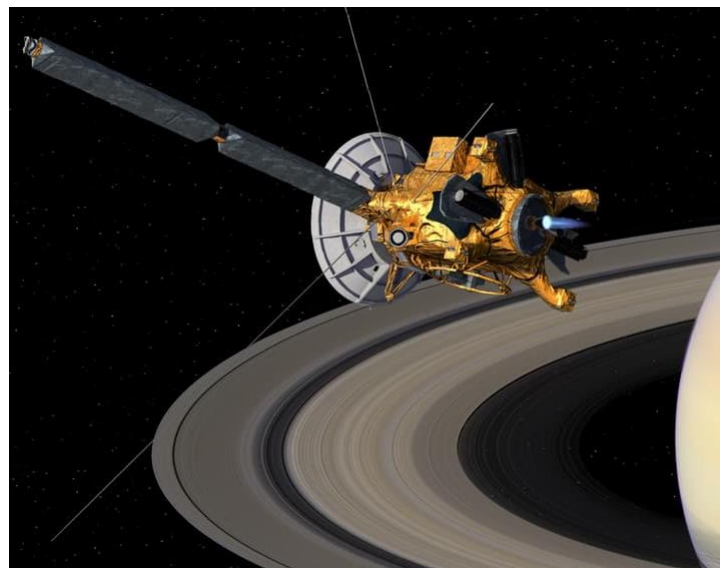
Характер і ступінь акустичного впливу, так само як і вибір механічної розрахункової моделі обуреного руху, знаходяться в прямій залежності від співвідношення габаритів виробу і половини довжини звукової хвилі. У тому випадку, коли ця величина в межах одиниці, тоді акустичне навантаження прирівнюється до рівномірно розподіленим, а розрахункова модель - до твердого тіла на пружних зв'язках. Якщо ж габаритний розмір в кілька разів перевищує половину довжини, тоді зовнішній вплив розглядається як хвильовий, а вся конструкція - як система з розподіленими параметрами.

У вітчизняній і зарубіжній літературі досить повно відображені досягнення науки в боротьбі з шумом низької і середньої інтенсивності (не вище 130 дБ) [4,5,6,7]. Що ж стосується вивчення властивостей конструкцій при впливі акустичних полів високої інтенсивності (160 ... 180 дБ), то вони знайшли ґрунтовне відображення лише в декількох наукових працях, в основному, стосовно до елементів конструкцій літаків [8,9,10]. Питання ж акустичної стійкості деяких типів бортової апаратури і їх комплектуючих висвітлені роботі [11].

Сучасні програми по запуску в космос нових систем супутникового зв'язку та систем зондування вимагають створення космічних апаратів (КА) нового покоління з підвищеними вимогами до їх якості, надійності та конкурентоспроможності [12]. Основну роль в забезпеченні працездатності КА грають силові каркаси до яких кріпляться джерела електричної енергії - фотоелектричні перетворювачі (рис.1) [13,14].



а)



б)

Рис. 1. Автоматична міжпланетна станція Кассіні-Гюйгенса: а) Відкриті стартові позиції ракети-носія Титан IV-В Центавр; б) Космічний апарат *Cassini*.

Під час старту ракети-носія (РН) її каркас відчуває силовий вплив, від вібрації стартової площадки та її комплектуючих, особливо під дією

реактивного потоку (рис.2). В зоні реактивного потоку акустичний тиск сягає 180 дБ, а на поверхні корпусу ≈ 165 дБ. Ці чинники є найбільш небезпечними, при чому вібрація входить в середину корпусу тільки через опори, а акустичне випромінювання і через опори і через всю поверхню корпусу апарату. Для РН з кільцевим розташуванням сопел двигуна пульсації акустичного тиску призводять до вимушених поздовжніх пружним коливанням всієї конструкції в цілому. Фізична природа акустичних полів пов'язана з газодинамічними процесами в повітряному потоці: пульсаціями швидкості і тиску на границях реактивного струменя двигуна РН; пульсаціями тиску в турбулентному прикордонному шарі; зривом потоку і іншими його збуреннями [15,16,17].



Рис. 2. Ракета-носій *Vega*

Уявлення про рівень і характер вібрацій від акустичних навантажень для деяких типів літальних апаратів дають результати досліджень, опублікованих в роботах [17,18].

Пошкодження конструкцій від звукового тиску мають вигляд необоротних деформацій поверхонь. Особливість акустичних навантажень - висока частота, тому процес накопичення втомних пошкоджень проходить дуже швидко. Наприклад, в роботі [16] вказується, що термін служби звичайної конструкції при рівні тиску в 160 дБ обчислюється годинами, а при тиску 170 дБ - лише *секундами*.

Єдиним достовірним методом оцінки акустичної міцності є натурний експеримент над готовою конструкцією або напівнатурні лабораторні дослідження над її моделями, що дає дещо менш надійні результати [16,18].

Звукові коливання мають безперервну безліч частот. Тому практично завжди якісь з частот власних коливань конструкції збігаються з частотами звукових коливань, що призводить до виникнення явища резонансу, при якому в елементах конструкції виникають напруження, які значно перевищують напруги від статичного тиску того ж звукового навантаження [18].

В даний час в інженерній практиці шумоізоляції полів високої інтенсивності знаходять застосування ті ж методи і засоби, що і для акустичних полів середнього та низького рівнів. Однак ефективність і універсальність цих методів досить низька. Так, наприклад, пасивні методи мають цілий ряд істотних недоліків, а перспективні компенсаційні методи взагалі не знайшли розвитку.

Разом з тим, силове акустичне навантаження призводить до якісно нового стану багатьох конструкцій, бортової електронної апаратури, зокрема пілотажно-навігаційного обладнання і приладів командно-вимірювальних комплексів. Деякі з них знаходяться в стані знакозмінних оборотних деформацій, в інших виникають напруження, що перевищують допустимі значення, треті - взагалі не можуть функціонувати в номінальному режимі. Розсіювання звукової енергії в елементах конструкцій при коливаннях механічних систем призводить до порушення акустичної стійкості.

Актуальність теми. Ракетно-космічна індустрія має вже досить тривалий розвиток у часі, разом з тим, набувають стрімкого розвитку гіперзвукові технології суборбітального і атмосферного призначення. Поряд з безумовними перевагами гіперзвукового руху стрімке збільшення швидкості літальних апаратів до 20М призводить до розвитку і поширення фізичних явищ – таких як потужна вібрація корпусу ЛА, проблеми в управлінні рухом, надвисокі температури (до 2000 °С), ударна N-хвиля та

інші менш значні чинники. Окрім зазначених чинників набуває вирішального значення, як з'ясувалося, проникаюче акустичне випромінювання високої інтенсивності і широкого частотного спектру.

Найбільш неприємним чинником у цьому питанні постає можливість прояву локальних та глобальних особливостей функціонування апаратури та виникнення додаткових похибок, зокрема на резонансному рівні. В дисертація головна увага приділяється дії одного із специфічних впливових зовнішніх негативних чинників, а саме - проникаючого акустичного випромінювання на поплавковий гіроскоп, принциповою особливістю якого є наявність поліагрегатного підвісу. За певних умов проникаюче акустичне випромінювання, як з'ясувалося, набуває першорядного значення з точки зору негативного впливу на бортову апаратуру. Попердню кількісну і якісну характеристики цього впливу можливо здійснити за допомогою розрахункових моделей пружної взаємодії проникаючого акустичного випромінювання з елементною базою ЛА, які повинні адекватно відобразити натурні умови функціонування льотних виробів, з цією метою слід окреслити принципи побудови розрахункових моделей не тільки за зосередженого проникнення акустичного випромінювання у середину крізь опори приладу, подібно звуковому містку, а і з огляду на особливості просторового розповсюдження акустичного випромінювання. Вирішення цих задач на даний час являє собою надзвичайно актуальну проблему пілотованої та безпілотної суборбітальної і ТЕРРА-аеронавігації.

Обґрунтуванням необхідності проведених досліджень слугує той факт, що на теперішній час природа пружної взаємодії проникаючого акустичного випромінювання з бортовою апаратурою розкрита недостатньо повно і залишається ще багато непроаналізованих аспектів цієї дії, в першу чергу, на резонансному рівні. Зокрема, йдеться про виникнення резонансних явищ нової фізичної структури, таких як хвильове співпадання, або геометричний резонанс, формування зон підвищеної енергетики поліагрегатного підвіса гіроскопа у вигляді *зон каустики* та особливості підвісу гіроскопа в умовах

наявної аберації звукових хвиль генеруємих в корпусі, і транслюємих в рідинно-статичну частину підвісу.

Сутність поставленої наукової задачі полягає у проведенні поглибленого аналізу природи пружної взаємодії проникаючого акустичного випромінювання з поліагрегатною системою підвісу серійно випускаемого авіаційною промисловістю поплавкового гіроскопа класу ДУСУ-2, формулюванні принципів побудови розрахункових моделей вивчаємого явища і окреслення особливостей наближених і точних розрахункових моделей. Проаналізувати можливість подвійного використання зон каустики для розв'язання комплексних задач експлуатаційного використання льотних виробів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові дослідження було проведено на кафедрі біотехніки та інженерії НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» відповідно до НДР «Фокусування енергії і виникнення зон каустики в поліагрегатних системах під дією потужної *N*-хвилі», державний реєстраційний номер 0112U008154 від 23.10.2012 р. та НДР «Суборбітальні і атмосферні гіперзвукові технології і проблеми terra-аеронавігації при вирішенні загальнонаціональних інтересів у сфері безпеки» державний реєстраційний номер 0116U006757 від 03.06.2016 р.

Мета і задачі досліджень. Метою досліджень постає аналіз природи впливу акустичного випромінювання на поліагрегатний підвіс гіроскопа і виникнення додаткових похибок вимірювань на резонансному рівні хвильового співпадання.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні задачі:

- побудовані розрахункові моделі: за передумови великого хвильового розміру корпусу приладу (наближена розрахункова модель) – для випадку коли антисиметричний імпеданс корпусу набагато менше симетричного імпедансу, або симетричний імпеданс набагато менше антисиметричного імпедансу; за умови незначного хвильового розміру корпусу (уточнена

розрахункова модель), що надає можливість окреслити сутність прояву резонансів для обох моделей розрахунку;

- здійснюється інтегральна оцінка формування резонансної ситуації в підвісі гіроскопа за одночасної зміни варіативних параметрів наближеної і уточненої моделі – комбінований резонанс;

- аналізується природа дії проникаючого акустичного випромінювання на поліагрегатний підвіс гіроскопа, породжуюча певну кількість особливостей динаміки, зокрема, у вигляді глобальних і локальних проявів, внаслідок наявної об'ємної нелінійності підвісу гіроскопа;

- з'ясовуються умови прояву аберації випромінюваних корпусом приладу звукових хвиль в рідину підвісу, і формування за цих умов поверхні зон каустики, експериментальними дослідженнями встановлюється ступінь адекватності побудованих розрахункових моделей реаліям експлуатаційних умов;

- проводяться напівнатурні дослідження серійно випускаемого поплавкового гіроскопа класу ДУСУ2, з метою встановлення відповідності точносних характеристик приладу паспортним вимогам;

- доводиться необхідність і проводиться оцінка ефективності штучно створеної буферної зони для забезпечення гіроскопа від негативного впливу проникаючого акустичного випромінювання;

- проаналізована технічна можливість комплексного використання зони каустики при вирішенні питань зниження технологічних ризиків засобів оборони різного класу.

Об'єктом досліджень слугує процес пружної взаємодії проникаючого акустичного випромінювання з поліагрегатним підвісом гіроскопа.

Предметом досліджень обрано серійно випускаємий авіаційною промисловістю двостепеневий поплавоківий гіроскоп класу ДУСУ2-30В.

Методи досліджень базуються на використанні:

- методи променевої акустики для аналізу наближених розрахункових моделей вивчаемого явища за умови великого хвильового розміру корпусу

приладу (Розділ 1);

- методи теорії оболонок для побудови точних розрахункових моделей (Розділ 1);

- методи гідроакустики для окреслення умов і розвитку у часі *zone kaustikos* у рідинній складовій підвісу гіроскопа (Розділ 2);

- методи теорії автоматичного керування при вирішенні задач компенсації впливу на підвіс гіроскопа висхідних теплових потоків і наявного градієнту тепла (Розділ 3);

- методи будівельної акустики для дисипації енергії проникаючого акустичного випромінювання (Розділ 3);

- методи гідроакустики для штучного формування буферної зони гіроскопічного приладу, а також для вирішення комплексних задач функціонування спеціальних об'єктів з метою їх маскування та формування обмеженої примітності (Розділ 4).

Наукова новизна одержаних результатів

Проаналізована ефективність створення буферної зони у вигляді захисного тунелю модульної конструкції для фортифікаційних споруд танків з обмеженим сектором обстрілу, субмарин за відсутності власного ходу та засобів палубної винищувальної авіації і створена аналітична база для вивчення явища з метою подальшого росту ефективності маскувальних засобів вогневої техніки.

1. Сформульовані принципи побудови розрахункових моделей пружної взаємодії проникаючого акустичного випромінювання з поліагрегатним підвісом поплавкового гіроскопа, окреслені умови виникнення чотирьох резонансів і чисельно спрогнозовані величини параметрів поплавкового підвісу, формуючих резонансну ситуацію.

2. Аналітично обґрунтована методика зменшення технологічних ризиків шляхом штучного формування зон каустики як буферної зони при вирішенні проблем зменшення похибок поплавкового гіроскопа в експлуатаційних умовах та вирішення комплексних задач функціонування рухомих об'єктів

спеціального призначення.

3. Проаналізовані супутні явища в поліагрегатному підвісі гіроскопа за експлуатаційних умов – виникнення глобальних рушійних потоків в рідині підвісу, характер локальних плинних потоків, висхідні теплові потоки та формуємий ними градієнт тепла в рідині.

4. Визначена структура виникаючих в підвісі зон каустики природного формування – у вигляді циліндричної поверхні конфокальної поверхні внутрішньої порожнини корпусу та у вигляді плоских радіальних поверхонь в площині шпангоута корпусу.

5. Чисельно означені величини похибок поплавкового гіроскопа на резонансному рівні хвильового співпадання – геометричного резонансу.

Практична цінність одержаних результатів полягає в наступному:

Матеріали дисертаційної роботи знайшли застосування в розробках ДП НВК «Фотоприлад» на етапі проектування тривісної гіростабілізованої платформи для баштової гармати танка, в умовах відкритої фортифікаційної споруди і обмеженого сектора обстрілу.

Створено програмний продукт для обчислення звукопроникності корпусу приладу, вплив співвідношення симетричної і антисиметричної складової імпедансу корпусу приладу.

Експериментально окреслені плоскі каустики в підвісі гіроскопа та зони в них підвищеного та помірного енергетичного стану.

Чисельно визначені умови прояву перших двох резонансів поплавкового підвісу за значної величини хвильового розміру корпусу.

Обчислені значення параметрів підвісу і напряму опромінювання ультразвуком, які формують третій резонанс у вигляді рівності сліду кола шпангоута і колової хвилі в корпусі на частотах нижчих за граничну f_{cp} .

Чисельно означені межі інтенсивного впливу параметрів підвісу на рівні четвертого резонансу – комбінований резонанс.

Експериментально доведена можливість вирішення комплексних задач маскування об'єктів різного призначення зокрема оборонного за допомогою

штучно сформованої поверхні каустики за допомогою додаткового опромінювання.

За результатами напівнатурних випробувань доведена можливість частинного порушення примітності військових об'єктів а також екіпажу і умови забезпечення повного маскування об'єктів – танків у фортифікаційних спорудах відкритого типу, субмарин, тактичної палубної авіації, тощо.

Особистий вклад пошукача.

Підготовка лабораторної установки для виконання експериментальних досліджень впливу ультразвукового променя на поплавковий гіроскоп. Наладка ультразвукової установки *MINI ULTRASONIC CLEANER MODEL 3560* та блоку ультразвукових випромінювачів марки УЗП-6-1 для з'ясування ступеня впливу кута падіння променя на поверхню циліндричного корпусу поплавкового гіроскопа. Виявлення зони резонансних явищ – наближених до кута співпадання та на кутах співпадання колових хвиль.

Практична наладка буферної зони для поплавкового гіроскопа і експериментальні дослідження реакції підвісу гіроскопа на ультразвуковий промінь – визначення зсуву нуля вихідного сигналу приладу, перерахунок на додаткову похибку приладу в акустичному середовищі.

Практична реалізація комплексних задач штучно формуємої поверхні каустики для маскування моделей танка, субмарини, літака.

Створення програмного продукту для визначення звукопроникності корпусу під дією ультразвукового променя з метою виявлення і характеру розвитку особливостей резонансного рівня. Виявлення екстремального росту звукопроникності корпусу приладу при різних співвідношеннях між симетричним і антисиметричним імпедансом матеріалу корпусу.

Експериментальне визначення наявності градієнта тепла в рідині поплавкового підвісу, його рівень і розвиток у часі.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідалися, обговорювалися та отримали визнання на наступних науково-практичних конференціях: Дев'ята міжнародна науково-практична

конференція «Інтегровані Інтелектуальні Робото-Технічні Комплекси (ІРТК-2016)», м. Київ, Україна (17 травня 2016р.); X Всеукраїнська науково-практична конференція «Біотехнологія XXI століття», м. Київ, Україна (22 квітня 2016р.); XIII Міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2017», м. Київ, Україна (19.04.2017р.); XI Всеукраїнська науково-практична конференція «Біотехнологія XXI століття», м. Київ, Україна (21 квітня 2017р.); Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ», м. Львів, Україна (11-12 травня 2017р.); XIV Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос», м. Дніпро, Україна (11 квітня 2012р.); XIX Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і Космос», м. Дніпро, Україна (12 квітня 2017р.); XI Міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», м. Київ, Україна (24 квітня 2012р.); X Міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2017)», м. Київ, Україна (16 травня 2017р.); VII Всесвітній конгрес «Авіація в XXI столітті», м. Київ, Україна (19-21 вересня 2016р.).

Публікації. За матеріалами дисертації надруковано 20 публікацій: 7 науково-технічних статей в виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, 11 доповідей і тез доповідей, 2 Патенти України на винахід.

Структура і об'єм дисертації

Дисертаційна робота містить Перелік умовних позначень і скорочень, Вступ, Аналіз стану вивчаємої проблеми досліджень, чотири Розділи, Висновки, Список використаних джерел з 112 найменувань та 33 Додатки. Основна частина роботи складає 132 сторінки друкованого тексту, а разом з Додатками 247 сторінки. В основній частині наведені 36 рисунків, 4 таблиці, 1 програма для чисельних обчислень.

У *Вступі* обґрунтовується актуальність теми досліджень, розкривається сутність поставленої наукової задачі, розкривається зв'язок роботи з

науковими програмами, планами, темами, формується мета і задачі досліджень, окреслюється об'єкт досліджень і обирається предмет досліджень, визначаються методи досліджень, підсумовується наукова новизна одержаних результатів та їх практична цінність, особистий вклад пошукача і апробація результатів дисертації, публікації за матеріалами дисертації, структура і об'єм дисертації.

В розділі *Аналіз стану вивчаємої проблеми досліджень* розглядається поглиблене вивчення природи виникнення зони каустики в поліагрегатному підвісі поплавкового гіроскопа і подальший вплив її на виникнення додаткових похибок гіроскопа в експлуатаційних умовах як першопричин породження технологічних ризиків аеронавігації, надається технічна характеристика сучасних гіперзвукових літальних апаратів, вирішення комплексних задач для оборонної галузі: аналізується і окреслюється значення питань маскуванню та обмеженої примітності деяких типів оборонної техніки – танка, субмарини, літаків тактичної палубної авіації.

Перший розділ присвячений побудові розрахункових моделей пружної взаємодії проникаючого акустичного випромінювання з поліагрегатним підвісом серійно випускаємого авіаційною промисловістю двоступеневого гіроскопа класу ДУСУ2. Аналіз причин і ступеня прояву резонансних явищ при зміні та співвідношення симетричної та антисиметричної складової механічного імпедансу корпусу.

Другий розділ присвячений аналізу технічних можливостей штучного формування буферної зони для боротьби з негативним впливом проникаючого акустичного випромінювання на прилад. Структура буферної зони базується як антипод *zone kaustikos* у рідинній частині підвісу гіроскопа, наводяться результати експериментальних досліджень ефективності штучної буферної зони в напівнатурних умовах.

Розділ третій присвячений аналізу маловідомих плоских *zone kaustikos* і результати формування їх у рідині при експериментальних дослідженнях в акустичному середовищі. Експериментально досліджуються особливості

виникнення градієнта теплоти в рідинно-статичній складовій підвісу гіроскопа, рекомендовано технічні рішення компенсації градієнта теплоти вихідних потоків на похибку приладу, пропонується технічне рішення для ліквідації *zone kaustikos* при експлуатаційному використанні приладу.

В *четвертому розділі* аналізується можливість розширення практичних задач комплексного використання *zone kaustikos* для потреб маскування рухомих об'єктів в цілому за одночасного зменшення додаткових похибок поплавкового гіроскопа в експлуатаційних умовах.

Будуються розрахункові моделі штучного формування буферних зон у вигляді *zone kaustikos* з метою оцінки ступеня їх ефективності для зменшення ризиків експлуатаційних технологій засобів оборони – маскування і обмеженої примітності в цілому, підвищення точності гіроскопічних сенсорів палубної авіації, засобів силової стабілізації баштових гармат танків, ступеня маскування субмарин від глибоководного бомбометання та деякі інші.

У *Висновках* по дисертаційній роботі в цілому наводиться інтегральна оцінка додаткових похибок ПГ в експлуатаційних умовах, обчислюються їх чисельні значення, аналізуються причини виникнення додаткових похибок вимірювань на резонансному рівні хвильового співпадання, пропонуються деякі технічні рішення для збереження відповідності характеристик приладу Паспортним вимогам.

В *Додатках* представлені відомості щодо практичного використання результатів досліджень в розробках промисловості, програми обчислень резонансного кута ψ , звукопроникності корпусу поплавкового гіроскопа за умови формування комбінованого резонансу, робоче місце для проведення стендових напівнатурних досліджень гіроскопічного приладу класу ДУСУ2-30В.

АНАЛІЗ СТАНУ ВИВЧАЄМОЇ ПРОБЛЕМИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Останнім часом все більшого розмаху набувають гіперзвукові технології на суборбітальному та атмосферному рівні. Переваги суборбітального руху зі швидкостями до 20М діалектично поєднуються з вадами гіперзвукового руху у вигляді надвисоких вібрацій, проблем в управлінні рухом, високими температурами, тощо. Таким чином, постає, окрім іншого, проблема зниження технологічних ризиків до допустимого рівня. Вирішуючи цю задачу слід, перш за все, проаналізувати причини і механізм розвитку локальних і глобальних особливостей механічних систем пілотажного і навігаційного обладнання літальних виробів.

Зупинимось на найменш вивченому зовнішньому збуренню, яке чинить вплив на бортову апаратуру у вигляді проникаючого акустичного випромінювання. Особливістю цього чинника постає його просторовий характер, що ускладнює опис механізму дії на механічні системи приладів управління. Конкретизуємо задачу і зосередимо увагу на серійно випускаємому авіаційною промисловістю двостепеневому диференціюючому гіроскопі з рідинно-статичним підвісом. Ці прилади знайшли широке використання не тільки в авіаційній промисловості, а і в інших сферах оборонної тематики. Ті переваги, які надає таким приладам рідинно-статичний підвіс у важкій рідині (питома вага більше 2,0) на основі фторорганічної чи хлорорганічної рідин, в умовах гіперзвукового руху та діючої ударної *N-хвилі* втрачає вихідні переваги, а натомість слугує причиною виникнення особливостей поліагрегатного підвісу, в тому числі, на резонансному рівні.

У становленні вітчизняної школи гіроскопії перш за все необхідно відмітити заслуги академіка Національної академії наук України професора Кошлякова В.М., а особливо його вклад у розвиток теорії гіроскопічного компаса [19], заслуженого діяча науки і техніки України, професора Павловського М.А., котрий вніс суттєвий вклад в розвиток цієї області знань

[20], професора Одинцова А.О. – засновника і завідуючого першої в Україні кафедри гіроскопічних приборів і приладів [21], професора Бублика Г.Ф. [22], професора Самотокіна Б.Б. [23], лауреата Державних премій України, професора Збруцького О.В., який займався ретельним вивченням динамічно-налагоджуваних гіроскопів. Роботи заслуженого діяча науки і техніки України, професора Безвесільної О.М. присвячені вивченню аспектів гравіметрії [24,25]. Професор Л.М. Рижков займався синтезом астатичних систем стабілізації [26]. Питанням корекції дрейфу вібраційного гіроскопа займався професор В.В. Чіковані [27]. Роботи к.т.н., с.н.с Ф.М. Захаріна присвячені уніфікації інтегрованих інерціально-супутникових навігаційних систем [28,29,30]. В роботах професора В.М. Корольова вивчалися питання навігації наземних рухомих об'єктів [31,32,33].

Поплавок, який містить в середині гіромотор в інертному газі під дією проникаючого акустичного випромінювання збуджує хвильові процеси в поверхні з частотою падаючої звукової хвилі. Таким чином, суперпозиція генеруємої акустичної вібрації поверхні поплавка з кутовим рухом корпусу літального апарату призводить до виникнення *Ейлерових* сил інерції, які повинні знайти своє місце в диференціальних рівняннях руху поплавкового гіроскопа, в правій частині. Якщо прийняти за акустичне навантаження тільки *косинусну* його складову, тоді момент сил інерції *Коріоліса* буде, очевидно, породжувати явище вибіркової частоти акустичної вібрації кутовим рухом апарату і призводити до появи в рівняннях руху гіроскопа сталих складових, зрозуміло, що стала складова буде породжувати і сталу похибку вимірювань.

Окрім розглянутого явища, поліагрегатна структура підвісу і конструкційна нелінійність внутрішньої порожнини корпусу гіроскопа за певних умов створює ситуацію появи у статично-вихідному рідинному підвісі зони підвищеної енергетики, поверхня яких конфокальна до внутрішньої поверхні порожнини корпусу. Наявність таких зон призводить до додаткового збурення і, таким чином, до появи додаткових похибок

вимірювань. В основному це стосується колових хвиль генеруємих в корпусі приладу на частотах нижче за граничну f_{gp} .

Створення *zone kaustikos* обумовлене аберацією випромінюваних корпусом звукових хвиль у рідину. Разом з тим це явище не єдине, яке стає на заваді нормальному функціонуванню поплавкового гіроскопа. В рідинно-статичному підвісі, окрім іншого, за певних умов породжуються також і плоскі каустики, які ще підлягають вивченню і окресленню їх розвитку у просторі і часі. Характерною особливістю плоских каустик постає прояв явищ інтерференції звукових хвиль і виникнення, потому, зон пониженої та підвищеної енергетики, у вигляді суміжних центральних радіусів.

Найбільший інтерес динаміки гіперзвукового руху в даному випадку, являють не стільки зазначені явища, скільки прояв особливостей резонансного типу у вигляді хвильового співпадання, тобто геометричного резонансу генеруємих і падаючої ззовні хвилі. Як показують дослідження, наявність в підвісі рідинно-статичної складової у сукупності з об'ємною нелінійністю внутрішньої порожнини корпусу надає широкі можливості для резонансних проявів в підвісі, і потому, породження додаткових похибок вимірювань. Побудова розрахункових схем явища значно спрощується якщо розглядати два шляхи формування розрахункової моделі, а саме, для випадку значного хвильового розміру внутрішньої порожнини та, навпаки, невеликого значення хвильового розміру. В першому випадку можна розглядати елемент порожнини як плоский, і користуватися відомими методами аналізу, в другому – слід для вивчення явища користуватися диференціальними рівняннями систем з розподіленими параметрами у вигляді тонкої оболонки.

Ступінь впливу проникаючого акустичного випромінювання на появу додаткових похибок гіроскопа, може бути окреслено величиною акустичної проникності випромінювання через корпус приладу. Аналіз подальших досліджень слід виконувати для двох випадків – коли антисиметричний імпеданс значно більше симетричного імпедансу ($Z_c \ll Z_a$), і навпаки, коли

симетричний імпеданс значно більший за антисиметричний імпеданс ($Z_a \ll Z_c$).

Таким чином, постає надзвичайно актуальною і суттєво важливою задача з'ясування природи пружної взаємодії проникаючого акустичного випромінювання з поліагрегатною системою підвісу, виявлення особливостей та розвиток їх у часі і просторі за певних обставин. Найбільш цікавою і важливою постає проблема виявлення умов формування в підвісі резонансної ситуації і, як наслідок, стрімкий ріст похибок вимірювань.

Згідно зазначеному подальші теоретичні і експериментальні дослідження будуються з огляду на небезпеку виникнення особливостей резонансної структури в підвісі гіроскопа. Робочий механізм аналізу спирається на значення звукопроникності корпусу приладу, як вже відзначалось.

Класичні диференціальні рівняння поплавкового двоступеневого дифіренціюючого гіроскопа в своїй правій частині містять корисний момент та моменти перешкоди. До останніх відносяться момент від впливу перехресних зв'язків (перехрестні кутові швидкості), інерційний момент по переносному русі відносно вихідної осі приладу, моменти дебалансу, моменти тертя та інші менш значні збурюючі моменти. Особливістю диференціального рівняння постає той чинник, що в правій частині має місце суперпозиція збурюючих моментів. Разом з тим в акустичних полях високої інтенсивності в поверхні поплавок генерується акустична вібрація і таким чином поплавок стає пружно-податливим. Коливання поверхні поплавок під дією проникаючого акустичного випромінювання на хитавиці корпусу породжують Ейлерові сили інерції у вигляді сил інерції Коріоліса, які за своєю природою визначають механічний зв'язок між відносним рухом поверхні поплавця (акустичною вібрацією) і переносним рухом (хитавиця фюзеляжу літального апарату). Наявність додатково цього збурюючого моменту дозволяє не тільки окреслити періодичну складову додаткової похибки в натурних умовах, але й окреслити небезпеку появи сталої

складової в правій частині рівнянь. Стала складова, як відомо, найбільш небезпечна, бо породжує сталу похибку вихідного сигналу.

Механізм появи сталої складової розкривається наступним чином. Якщо вібрацію поверхні поплавка визначити тільки дійсною складовою, тобто через $\cos \omega_t$, тоді збурюючий момент буде мати вигляд добутку кутової швидкості хитавиці на лінійну швидкість пружних переміщень поверхні поплавця. Таким чином, виникає небезпека появи сталої складової збурюючого моменту, коли кутова швидкість акустичної вібрації і кутова швидкість хитавиці фюзеляжу будуть дорівнювати, тобто має місце ефект вибіркості частот хитавиці у акустичних коливань поверхні поплавка під дією проникаючого акустичного випромінювання.

Слід особливо зазначити той факт, що відомі засоби і поняття наявності градієнта тепла в підвісі гіроскопа, заслуговують на їх ліквідацію і технічні рішення з цього приводу в повному обсязі розглянуті. Але, експериментально доведено, що проникаюче акустичне випромінювання підвищує температуру рідинно-статичної складової підвісу до 30°C за 10-15 хвилин роботи в акустичному середовищі. Таким чином, слід приймати до уваги не тільки температуру комплектуючих внаслідок роботи гіродвигуна, але і вплив проникаючих акустичних хвиль, як таких, що теж впливають на зміну температури в підвісі гіроскопа. Що цьому наслідує, висхідні теплові потоки в рідинній частині певним чином будуть закручувати рухому частину підвісу, тобто поплавець, і призводити до додаткових похибок, при чому градієнт тепла в дифузному акустичному полі складно спрогнозувати, і таким чином потрібно ставити задачу на миттєву компенсацію (або інше технічне рішення) впливу градієнту тепла в рідинно-статичній частині підвісу.

РОЗДІЛ 1. ТЕХНОЛОГІЧНІ РИЗИКИ І ПОХИБКИ ПОПЛАВКОВОГО ГІРОСКОПА В АКУСТИЧНОМУ СЕРЕДОВИЩІ НАТУРНИХ УМОВ НА РЕЗОНАНСНОМУ РІВНІ

Припущення стосовно впливу проникаючого акустичного випромінювання з боку рушійних установок ракет-носіїв, зокрема РН Енергія, належить відомим вченим ракетно-космічної галузі проф. *Латину А.А.* і проф. Павловському М.А., який з повним правом може вважатися фундатором створення на Україні нового наукового напрямку – вивчення і розкриття природи впливу проникаючого акустичного випромінювання на бортову апаратуру льотних виробів суборбітального і TERRA- навігаційного спрямування рухомих об'єктів. Надалі розвиток окресленого наукового напрямку продовжувала велика армія його учнів і колег.

З'ясування природи і побудова розрахункових моделей вивчаємого явища йшла від простих, наближених, до більш точних, складних. Перші роботи були присвячені вивченню динаміки елементної бази підвісу гіроскопа – пластинчатої і оболонкової геометрії, нескінченних по протяжності [34,35,36]. Надалі розрахункові моделі уточнювались і набули вигляду пластин і оболонок обмеженої протяжності [37], вивчалася акустична вібрація поверхні комплектуючих поплавкового гіроскопа, особливості її розвитку уздовж поверхні (тривимірна задача) і, нарешті, аналіз динаміки комплектуючих з огляду на можливість виникнення особливостей резонансного типу [38]. Вивчалися також плоско-паралельні анізотропні пластини, що з'єднувались пружною в'яззю [39], напружено-деформований стан поверхні поплавка [40], дія на фрагменти поверхні поплавка акустичного навантаження [41], струнного підвісу [42], і, нарешті, вивчалась динаміка поліагрегатного підвісу гіроскопа [43]. Це були перші отримані результати аналізу природи явища і описували власне акустичну вібрацію поверхні будь-якого елементу, або їх поєднання.

1.1. Побудова розрахункової моделі пружної взаємодії корпусу ДУСУ2 з проникаючим акустичним випромінюванням. Хвильовий розмір корпусу приладу суттєво перевищує одиницю ($1 \ll kR$)

Проведемо ретельний аналіз впливу радіальних (в площині шпангоута) хвиль оболонкової частини корпусу гіроскопічного датчика кутових швидкостей класу ДУСУ та розповсюджуючихся по паралелі пружних (колових) хвиль, виникнення яких відбувається під впливом зовнішнього проникаючого акустичного випромінювання гіперзвукового польоту.

Генеруєма в корпусі ДУСУ радіальна хвиля і хвиля, що біжить уздовж паралелі, будуть випромінювати у рідинно-статичну частину підвісу гіроскопа звукові хвилі. Вони і будуть, за наявності хвильового співпадання, слугувати причиною формування в рідині зон енергетичної активності – *зон каустик*.

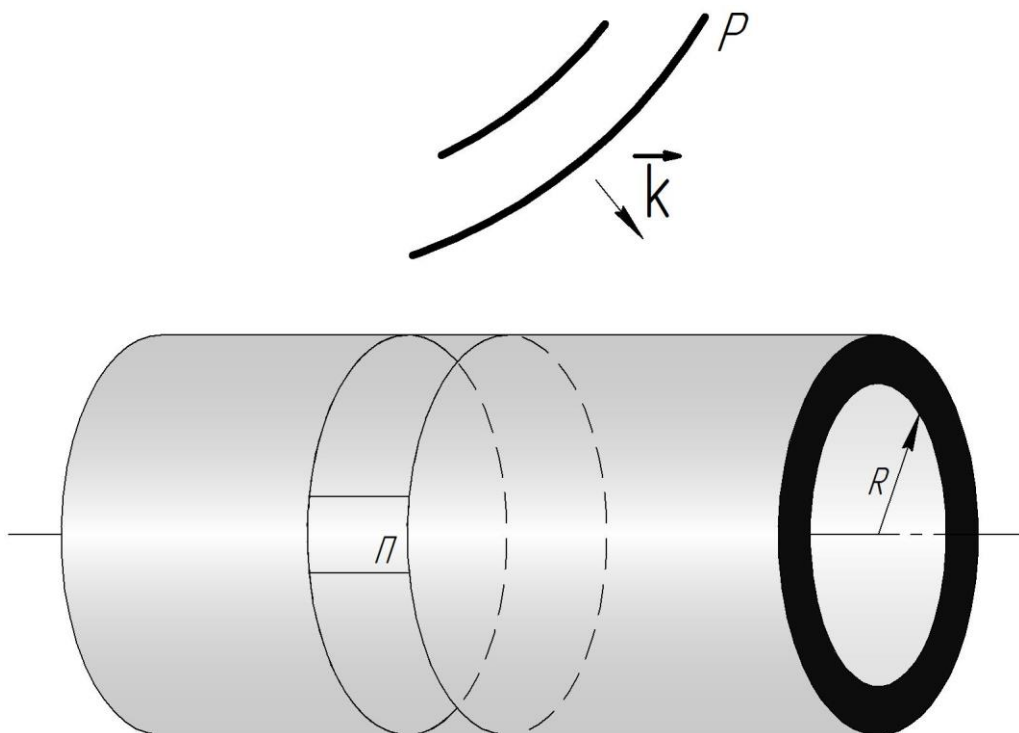


Рис. 1.1. Корпус датчика кутових швидкостей ДУСУ

Наближену розрахункову модель будемо з огляду на наявний великий хвильовий розмір $1 \ll kR$, що дозволяє спростити вихідні чинники в аналітичній структурі явища, замінивши оболонкову частину корпусу на

дискретно-неперервну сукупність тонких пластин нульової кривизни, які випромінюють в рідину акустичні хвилі внаслідок згинного руху $W(t, z, \varphi)$ та пружних коливань $U_\varphi(t, z, \varphi)$ по паралелі (рис. 1.1). Почнемо з вивчення згинного руху елементарної (платкої) ділянки внутрішньої поверхні корпусу.

Радіальні (згинні) коливання поверхні корпусу під дією ультразвукового випромінювання.

Обумовлена умова значного хвильового розміру корпусу, тобто виконання співвідношення

$$1 \ll kR, \quad (1.1)$$

дозволяють надалі розглядати окремо взятий елемент поверхні корпусу у вигляді тонкої, пружної, ізотропної пластини нескінченної протяжності і товщиною 2δ (рис. 1.2) [44, 45].

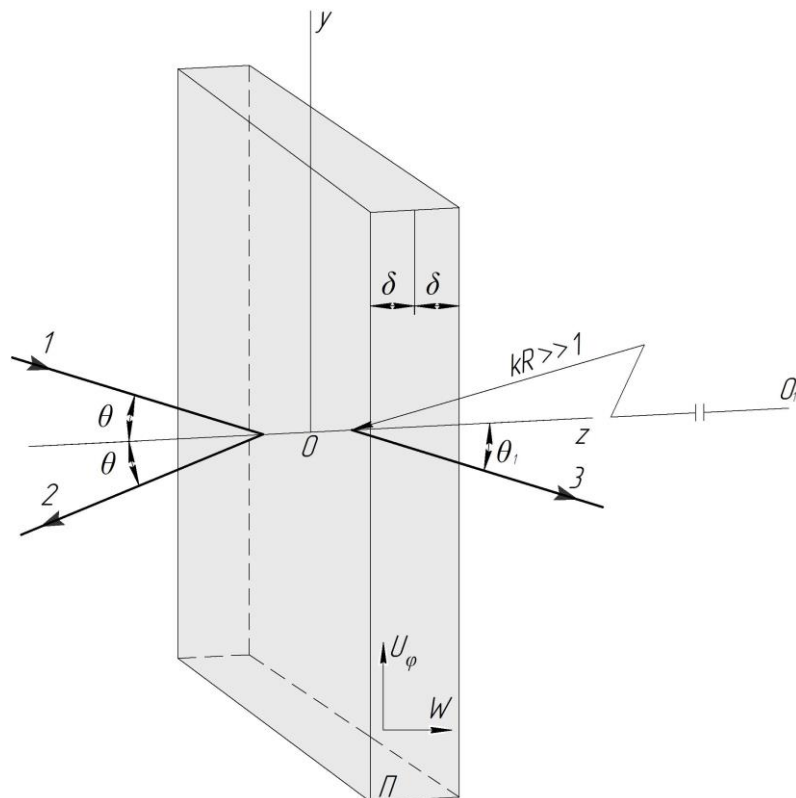


Рис. 1.2. Проходження ультразвукового променя крізь пружний ізотропний шар шпангоута

Приймаємо, що на пластину падає плоска звукова хвиля “1” під кутом θ . Ось Ox паралельна фронту збурення. Тиск в падаючій хвилі приймемо у вигляді

$$P_1 = P_{10} \exp i \{ \omega t - k_{\epsilon} [(z + \delta) \cos \theta + y \sin \theta] \}, \quad (1.2)$$

де $k_{\epsilon} = \frac{\omega}{c_0}$ – хвильове число повітряного середовища ззовні корпусу;

P_{10} – амплітуда тиску в падаючій хвилі “1”. Якщо прийняти хвильові числа з лицьової і тіньової сторін однаковими, тоді $\theta_1 = \theta$. Якщо ні, тоді слід використати закон Снеліуса:

$$\frac{c_0}{\sin \theta} = \frac{c_1}{\sin \theta_1}.$$

В нашому випадку $\sin \theta_1 \approx 6 \sin \theta$; $k_{\text{жс}} = \frac{k_{\epsilon}}{6}$.

Тиск у відбитій “2” і пройдешній “3” хвилях можна записати у вигляді –

$$\begin{aligned} P_2 &= P_{20} \exp i \{ \omega t - k_{\epsilon} [-(z + \delta) \cos \theta + y \sin \theta] \}; \\ P_3 &= P_{30} \exp i \{ \omega t - k_{\epsilon} [(z + \delta) \cos \theta_1 + y \sin \theta_1] \}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Як видно, має місце плоска деформація шару пластини в напрямку y, z , бо відсутня третя координата x , (уздовж неї тиск не змінюється).

Відомо, що коливання пластин з жорстких матеріалів у цьому випадку описуються рівняннями руху тонких пластин у формі *Ламе*, але за умови, що довжина сліду падаючої хвилі не менша за шістьку товщин пластини:

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial y \partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \right) &= \rho_c \frac{\partial^2 V}{\partial t^2}; \\ (\lambda + \mu) \left(\frac{\partial^2 V}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 W}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} \right) &= \rho_c \frac{\partial^2 W}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (1.4)$$

де V, W – пружні переміщення в напрямку осей O_y і O_z ; ρ_c – щільність шару матеріалу; λ, μ – пружні сталі *Ламе*

$$\lambda = \frac{E\sigma}{(1+\sigma)(1-2\sigma)};$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\sigma)};$$

E – модуль Юнга; σ – коефіцієнт Пуассона.

Поклавши в рівняннях (1.4)

$$V = \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \frac{\partial \psi}{\partial z}; \quad W = \frac{\partial \varphi}{\partial z} + \frac{\partial \psi}{\partial y},$$

після підстановки отримуємо два рівняння

$$\begin{aligned} \nabla^2 \varphi + k_1^2 \varphi &= 0; \\ \nabla^2 \psi + k_2^2 \psi &= 0, \end{aligned} \quad (1.5)$$

де $k_1 = \omega c_1^{-1}$; $k_2 = \omega c_2^{-1}$ – хвильові числа для колових U_φ і поперечних

W хвиль; $c_1 = \left[(\lambda + 2\mu) \rho_k^{-1} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\rho_k^{-1} E (1 - \sigma) (1 + \sigma)^{-1} (1 - 2\sigma)^{-1} \right]^{\frac{1}{2}}$ – швидкість розповсюдження колових хвиль у корпусі ДУСУ;

$c_2 = \left[\mu \rho_k^{-1} \right]^{\frac{1}{2}} = \left\{ E \left[2 \rho_k (1 + \sigma) \right]^{-1} \right\}^{\frac{1}{2}}$ – швидкість розповсюдження хвиль у поперечній площині.

Розв'язок рівнянь (1.4) визначає пружні переміщення поверхні корпуса приладу [45]:

$$\begin{aligned} V &= - \left[(C_1 \exp \alpha_1 z + C_2 \exp(-\alpha_1 z)) i k_\theta \sin \theta + (C_3 \exp \alpha_2 z - C_4 \exp(-\alpha_2 z)) \right] \times \\ &\quad \times \exp(-i k_\theta y \sin \theta); \\ W &= \left[(C_1 \exp \alpha_1 z - C_2 \exp(-\alpha_1 z)) \alpha_1 - (C_3 \exp \alpha_2 z + C_4 \exp(-\alpha_2 z)) i k_\theta \sin \theta \right] \times \\ &\quad \times \exp(-i k_\theta y \sin \theta), \end{aligned} \quad (1.6)$$

тут не врахований множник $\exp i \omega t$.

Надалі знаходимо значення нормальних напруг

$$\begin{aligned} Z_z &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial W}{\partial z} + \lambda \frac{\partial V}{\partial y} = \\ &= \left[(C_1 \exp \alpha_1 z + C_2 \exp(-\alpha_1 z)) a_1 - (C_3 \exp \alpha_2 z - C_4 \exp(-\alpha_2 z)) a_2 \right] \times \\ &\quad \times \exp(-i k_\theta y \sin \theta) \end{aligned} \quad (1.7)$$

і тангенціальних напруг

$$\begin{aligned}
Z_y &= \mu \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial y} \right) = \\
&= - \left[(C_1 \exp \alpha_1 z - C_2 \exp(-\alpha_1 z)) a_3 + (C_3 \exp \alpha_2 z + C_4 \exp(-\alpha_2 z)) a_4 \right] \times \\
&\times \exp(-ik_y y \sin \theta),
\end{aligned} \quad (1.8)$$

$$\text{де } a_1 = (\lambda + 2\mu) \alpha_1^2 - \lambda k_\theta^2 \sin^2 \theta;$$

$$a_2 = 2i\mu \alpha_2 k_\theta \sin \theta;$$

$$a_3 = 2i\mu \alpha_1 k_\theta \sin \theta;$$

$$a_4 = \mu (\alpha_2^2 + k_\theta^2 \sin^2 \theta).$$

З рівнянь (1.2) та (1.3) визначаємо звуковий тиск на зовнішню поверхню корпусу ДУСУ

$$(P_1 + P_2)_{z=-\delta} = (P_{10} + P_{20}) \exp(-ik_y y \sin \theta)$$

і на внутрішню поверхню корпусу

$$(P_3)_{z=\delta} = P_{30} \exp(-ik_{yc} y \sin \theta_1).$$

Акустичний тиск запишемо у вигляді суми *симетричної* P_c і *антисиметричної* P_a складових –

$$P_c = \frac{1}{2} (P_{10} + P_{20} + P_{30}) \exp(-ik_y y \sin \theta);$$

$$P_a = \frac{1}{2} (P_{10} + P_{20} - P_{30}) \exp(-ik_y y \sin \theta_1)$$

і з'ясуємо ступінь окремого їх впливу на вимушені коливання пластини “П”.

1.1.1. Симетричний імпеданс набагато менше від антисиметричного, $Z_c \ll Z_a$

Коли до пластини прикладена симетрична складова, граничні умови мають вигляд –

$$Z_z \Big|_{z=-\delta}^{z=\delta} = -P_c; \quad Z_y \Big|_{z=-\delta}^{z=\delta} = 0. \quad (1.9)$$

Чотири граничні умови (1.9) дозволяють винайти значення довільних сталих C_1, C_2, C_3, C_4 рівнянь (1.7) та (1.8) і в остаточному вигляді окреслити *симетричну* частину зміщення шарів пластини в поперечному напрямку z :

$$W_c|_{z=\pm\delta} = \pm \frac{P_c}{\rho_k \omega^2 \delta} k_2 \delta \times \left[4\gamma(\gamma-1)^{\frac{1}{2}} cthk_2 \delta (\gamma-1)^{\frac{1}{2}} - (2\gamma-1)^2 (\gamma-d)^{-\frac{1}{2}} cthk_2 \delta (\gamma-d) \right]^{-1}, \quad (1.10)$$

де $\gamma = \left(\frac{c_2}{c_s} \sin \theta \right)^2$; $d = \left(\frac{c_2}{c_1} \right)^2 = \frac{1-2\sigma}{2(1-\sigma)}$.

1.1.2. Антисиметричний імпеданс значно менший за симетричний імпеданс, $Z_a \ll Z_c$

Коли до пластини прикладена антисиметрична P_a складова тиску, граничні умови мають вид –

$$\begin{aligned} Z_z|_{z=-\delta} &= -P_a; & Z_y|_{z=-\delta} &= 0; \\ Z_z|_{z=\delta} &= P_a; & Z_y|_{z=\delta} &= 0. \end{aligned}$$

Тепер можна окреслити антисиметричну складову пружного зміщення:

$$W_a|_{z=\pm\delta} = \frac{P_a}{\rho_k \omega^2 \delta} k_2 \delta \times \left[4\gamma(\gamma-1)^{\frac{1}{2}} thk_2 \delta (\gamma-1)^{\frac{1}{2}} - (2\gamma-1)^2 (\gamma-d)^{-\frac{1}{2}} thk_2 \delta (\gamma-d) \right]^{-1}. \quad (1.11)$$

Якщо прийняти малими величини $k_2 \delta (\gamma-1)^{\frac{1}{2}}$ і $k_2 \delta (\gamma-d)^{\frac{1}{2}}$, тоді функції $thk_2 \delta (\gamma-1)^{\frac{1}{2}}$ та $thk_2 \delta (\gamma-d)^{\frac{1}{2}}$ можуть бути замінені першими двома членами їх розкладання в ряд Тейлора, тобто –

$$\begin{aligned} th k_2 \delta (\gamma-1)^{\frac{1}{2}} &= k_2 \delta (\gamma-1) - 3^{-1} \left[k_2 \delta (\gamma-1)^{\frac{1}{2}} \right]^3; \\ th k_2 \delta (\gamma-d)^{\frac{1}{2}} &= k_2 \delta (\gamma-d) - 3^{-1} \left[k_2 \delta (\gamma-d)^{\frac{1}{2}} \right]^3. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Це дозволить спростити вирази (1.10) і (1.11):

$$W_c|_{z=\pm\delta} = \mp \frac{P_c}{\rho_k \omega^2 \delta} \cdot \frac{k_2^2 \delta^2 (\gamma - d)}{4\gamma(1-d) - 1} = \mp P_c \delta \frac{1 - \sigma^2}{E} \cdot \frac{\left(\frac{c_{II}}{c_s} \sin \theta\right)^2 - \frac{1 - 2\sigma}{(1 - \sigma)^2}}{\left(\frac{c_{II}}{c_s} \sin \theta\right)^2 - 1}, \quad (1.13)$$

де $c_{II} = \left[E \rho_k^{-1} (1 - \sigma)^{-1} \right]^{\frac{1}{2}}$ – швидкість розповсюдження поздовжньої (колової в корпусі) хвилі в пластині “П” за симетричних коливань [46].

Аналогічно при антисиметричному навантаженні, якщо прийняти що $1 < \gamma$, отримуємо –

$$W_a|_{z=\pm\delta} = \frac{P_a}{\rho_k \omega^2 \delta} \cdot \frac{1}{\frac{4}{3} \gamma (\gamma - 1) k_2^2 \delta^2 (1 - d) - 1} \approx \frac{2P_a}{m_{II} \omega^2} \cdot \frac{1}{\frac{D \omega^2}{m_{II} c_s^4} \sin^4 \theta - 1}, \quad (1.14)$$

де $D = \frac{2}{3} \cdot \frac{E \delta^3}{1 - \sigma^2}$ – циліндрична жорсткість пластини “П”;

$m_{II} = 2 \rho_k \delta$ – питома маса.

Формула (1.14) являє собою відомий вираз закономірності згинних коливань тонкої пластини [47].

З’ясуємо межі застосування виразу (1.14) для *жорстких* і *м’яких* матеріалів. Під *жорстким* матеріалом будемо мати на увазі такий, в якому швидкості c_1 колова (по шпангоуту) і поперечна c_2 значно більші за швидкість c_s звука у повітрі. Корпус ДУСУ виготовлений з алюмінієвого сплаву, тому припустимо вважати його *жорстким* матеріалом, бо для дюралюмінія $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$, $c_2 = 3070 \text{ мс}^{-1}$.

Дослідження Ю.А. Нілендера, Е.С. Сорокіна, Th. Kristen, Н.В. Muller та ін. довели, що модуль Юнга E *жорстких* матеріалів, виміряний у динамічному і статичному режимах, практично нічим не відрізняється у широкому діапазоні частот. Тому, можна прийняти, що величини швидкостей c_1 і c_2 розповсюдження хвиль в коловому (уздовж паралелі корпусу) напрямку і в поперечній площині не залежать від частоти коливань і

обчислювати їх слід з статичних вимірів модулів Юнга і коефіцієнта Пуассона σ .

Таким чином, коливання перешкоди із *жорсткого* матеріалу під дією падаючої хвилі можуть бути описаними рівняннями руху тонких пластин, якщо довжина сліду падаючої хвилі не менша за шестикратну товщину пластини, тобто $12 \cdot 2\delta \cdot \sin \theta \leq \lambda_0$.

Звукоізоляція перешкоди від дії звуку характеризується часткою звукової потужності пройдешнього випромінювання. Коефіцієнтом проходження звуку A називається відношення амплітуди P_{30} пройдешньої хвилі до амплітуди P_{10} падаючої хвилі, тобто

$$A = P_{30} P_{10}^{-1}.$$

І, через те, що потужності, які переносяться хвилями, пропорційні квадратам амплітуди тисків, тому величина $|A|^2$ буде коефіцієнтом звукопроникності τ_0 перешкоди від падаючої під кутом θ звукової хвилі. Зрозуміло, що за дифузного поля, коефіцієнт звукопроникності τ_0 буде визначатися осередненням за Перісом –

$$\tau = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tau_\theta \sin 2\theta d\theta.$$

Коефіцієнти втрат в *жорстких* матеріалах дуже малі і можуть вважатися сталими. Так, для алюмінієвого сплаву, коефіцієнт втрат за частоти $f = 1 \text{ кГц}$ становить $1 \cdot 10^{-4}$, а в конструкції – приблизно дорівнює нулю.

Сумарна коливальна швидкість шарів перешкоди під дією симетричної і антисиметричної складових звукового тиску дорівнює сумі симетричних і антисиметричних швидкостей зміщення на лицьовій стороні корпусу ДУСУ (зовнішній бік) і різниці – на внутрішньому (тіньовому) боці корпусу.

З іншого боку, коливальні швидкості поверхні повинні бути рівними нормальним складовим швидкості коливання повітря на передній і на внутрішній (в рідині) стороні. Ці граничні умови можна записати у вигляді

$$\begin{aligned}\left. \frac{dW}{dt} \right|_{z=-\delta} &= \frac{P_1 - P_2}{\rho_{\theta} c_{\theta}} \cos \theta; \\ \left. \frac{dW}{dt} \right|_{z=\delta} &= \frac{P_3}{\rho_{\theta} c_{\theta}} \cos \theta,\end{aligned}\tag{1.15}$$

де $c_{\theta} = 6c_{\theta}$.

Вважаючи опір корпусу симетричним коливанням значно переважаючим опір антисиметричним коливанням, звукопроникність елементів корпусу виключно згинним коливанням можна записати у вигляді:

$$\tau_{\theta} = \left[\left(1 + \eta \frac{c_u^4}{c_{\theta}^4} \cdot \frac{m_{\Pi} \omega}{2\rho_{\theta} c_{\theta}} \sin^4 \theta \cos \theta \right)^2 + \left(1 - \frac{c_u^4}{c_{\theta}^4} \sin^4 \theta \right)^2 \left(\frac{\omega m_{\Pi}}{2\rho_{\theta} c_{\theta}} \cos \theta \right)^2 \right]^{-1}, \tag{1.16}$$

де ρ_{θ} – щільність повітря (маса в одиниці об'єму).

Обчислення кута співпадання θ_c за частот акустичного випромінювання $f = 35 \cdot 10^3 - 42 \cdot 10^3$ Гц [Додаток Б-1 – Додаток Б-9].

Очевидно, що на низьких частотах, коли $c_u < c_{\theta}$

$$\tau_{\theta} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega m_{\Pi}}{2\rho_{\theta} c_{\theta}} \cos \theta \right)^2}.$$

З ростом частоти ω швидкість згинних хвиль росте. Починаючи з деякої, так званої *граничної* (критичної) частоти, за відповідного кута падіння θ , завжди стає можливою рівність нулю другого члена знаменника у виразі (1.16), тобто

$$c_u = \frac{c_{\theta}}{\sin \theta_c}. \tag{1.17}$$

Співвідношення (1.17) окресляє явище хвильового співпадання за згинних коливань, яке виявлене Л. Кремером [48]. Поділивши обидві частини формули (1.17) на f , запишемо її вигляді (рис. 1.3)

$$\lambda_{\theta} = \lambda_u \sin \theta,$$

де $\lambda_g = \frac{c_g}{f}$ – довжина звукової хвилі на лицьовій (зовнішній) стороні корпусу ДУСУ; $\lambda_u = \frac{c_u}{f}$ – довжина хвилі згину в елементарній ділянці корпусу.

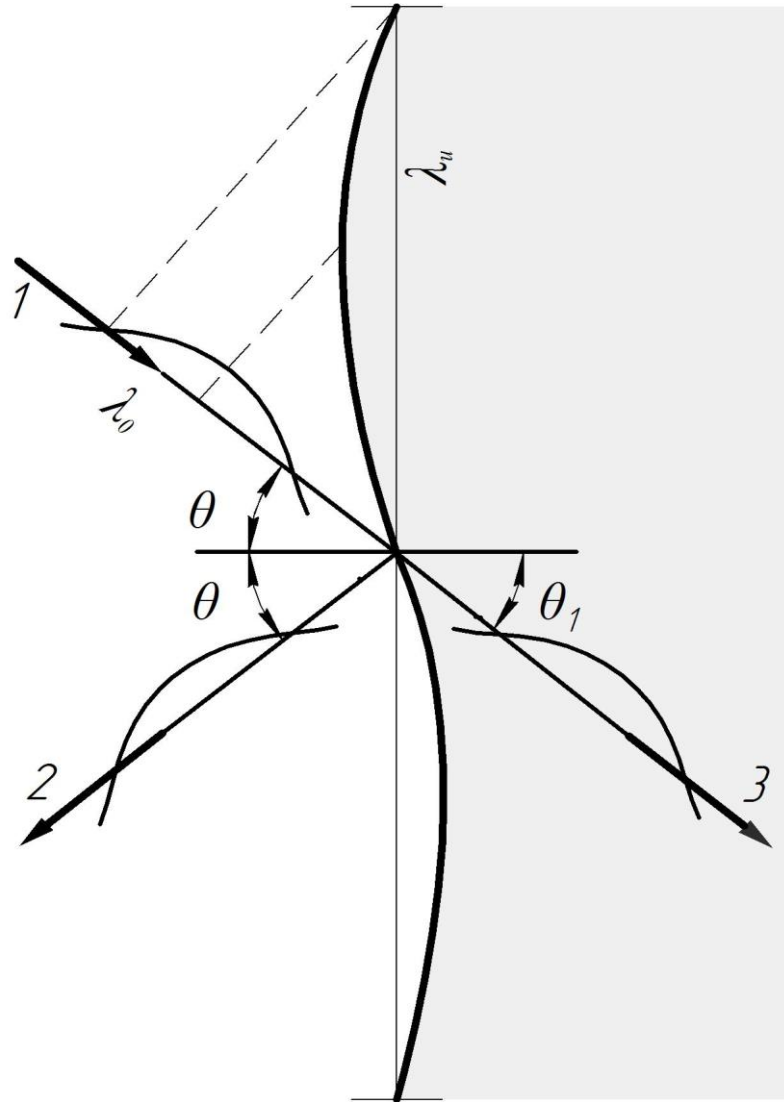


Рис. 1.3. Явище хвильового співпадання: 1 – падаюча хвиля;
2 – відбита хвиля; 3 – пройдешня хвиля

Ефект хвильового співпадання забезпечує трансляцію звукового випромінювання в зону акустичної *тіні* практично без дисипації енергії. На відміну від частотного резонансу, який породжений рівністю частот – власної і збурюючого чинника, – хвильовий резонанс має місце при рівності геометричних розмірів, а саме сліду падаючої хвилі і згинної хвилі. При хвильовому співпаданні розподіл тиску в падаючій хвилі «1» точно

відповідає розподілу пружних зміщень тієї ж частоти, що і слугує інтенсивному росту коливань.

За інших значень кута θ , звукопередача різко знижується, тобто зростає звукоізоляція. Мінімальна частота, за якої стає можливим хвильове співпадання (f_{zp}), буде, звичайно, якщо $\theta = \frac{\pi}{2} \text{ рад}$. Це походить з формули (1.17):

$$f = \frac{c_6^2}{2\pi \sin \theta} \sqrt{\frac{m_{II}}{D}}; \quad f_{zp} = f \Big|_{\theta=\frac{\pi}{2}} = \frac{c_6^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m_{II}}{D}}. \quad (1.18)$$

Починаючи з граничної частоти, характер проходження звуку крізь корпус окреслюється явищем співпадання. З формули (1.17) видно, що кожній частоті відповідає свій кут падіння θ_c , за котрого звукова хвиля проходить усередину з мінімальними втратами. *Слід зважити, що головне значення для звукопроникності на частотах $f_{zp} < f$ набуває зона кутів падіння*

$$\theta_c = \arcsin \frac{c_6}{c_u}.$$

Для ілюстрації виконаємо кількісну оцінку явища. Прийmemo для корпусу з дюралюмінію: $\sigma = 0,34$; $E = 74 \cdot 10^9 \text{ Нм}^{-2}$; $m_{II} = 5,4 \text{ Нс}^2$; $\omega = 2\pi f$; $f = 42 \text{ кГц}$; $\rho_k = 2,7 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3$; $\delta = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $c_6 = 331 \text{ мс}^{-1}$. Тоді

$$c_u = \sqrt[4]{\frac{D(2\pi)^2 f^2}{m_{II}}} = \sqrt[4]{\frac{2E\delta^3(2\pi)^2 f^2}{3m_{II}(1-\sigma^2)}} = 920,723 (\text{мс}^{-1});$$

$$c_u = \frac{c_6}{\sin \theta_u}; \quad \sin \theta_u = 0,3595; \quad \theta_u = 21^\circ 07';$$

$$c_{II} = \sqrt{\frac{E}{\rho_k(1-\sigma^2)}} = 5566,85 (\text{мс}^{-1});$$

$$c_{II} = \frac{c_6}{\sin \theta_{II}}; \quad \sin \theta_{II} = 0,0595; \quad \theta_{II} = 3^\circ 41'.$$

Отже, “акустично прозорим” корпус приладу стає за кутів падіння хвилі $\theta = 21^\circ 07'$ (в цьому випадку інтенсивна перекачка звукової енергії здійснюється згинною хвилею корпуса і цілком залежить від частоти f акустичного випромінювання), а також за кутів $\theta = 3^\circ 41'$ (в цьому випадку інтенсивну трансляцію звукової енергії здійснює колова (уздовж паралелі) швидкість, яка не залежить від частоти випромінювання).

Обидва ці значення кута θ найбільш небезпечні, бо слугують практично безперешкодному проходженню усередину приладу, точніше в рідинностатичну частину підвісу, акустичного випромінювання ззовні.

Симетрична складова

В цьому випадку імпеданс $Z_c \ll Z_a$, тобто опір матеріалу корпуса антисиметричним (згинним) коливанням значно більший опору симетричним коливанням. За цих умов має місце співвідношення

$$c_{II} = \frac{c_s}{\sin \theta}, \quad (1.19)$$

де $c_{II} = \left[E \rho_k^{-1} (1 - \sigma^2)^{-1} \right]^{\frac{1}{2}}$ – швидкість розповсюдження колової (поздовжньої) хвилі.

Вираз (1.19) визначає явище хвильового співпаданя за *симетричних коливань* корпуса, яке виникає кожного разу, коли слід падаючої і колової хвиль співпадають. *Зауважимо, що співпаданя залежить тільки від кута падіння хвилі і може проявлятися на будь-якій частоті випромінювання.*

1.2. Виникнення і розвиток резонансної ситуація в підвісі гіроскопа при зміні кута падіння акустичного променя ψ між поздовжньою віссю корпуса і хвильовим вектором

Проведений аналіз особливостей резонансного типу для обох розрахункових моделей – наближеної моделі (яка має вигляд елементарної пластини) і уточненої моделі (що має вигляд оболонки значної протяжності),

це дозволило виявити деякі розбіжності в результатах [48, 49, 50]. Отримані результати знайшли підтвердження в експериментальних дослідженнях [51,52].

Зупинимося більш детально на визначенні причин цієї розбіжності.

Уточнену розрахункову модель оберемо у вигляді колової циліндричної оболонки необмеженої довжини (рис. 1.4). Дослідження коротких оболонок відбувалось, наприклад, в роботі [53].

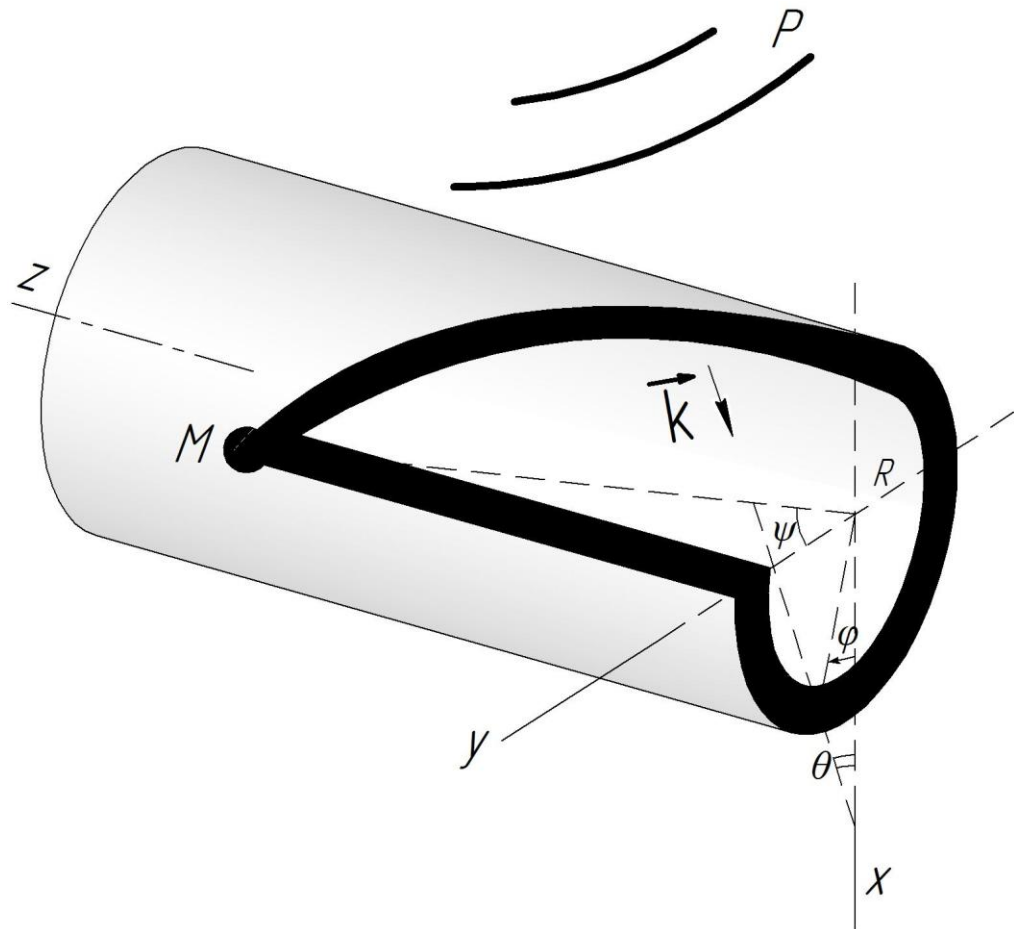


Рис. 1.4. Механізм дії акустичної хвилі на корпус поплавкового гіроскопа. Уточнена розрахункова модель

Будуємо подальші міркування виходячи з того припущення, що товщина оболонки 2δ досить мала порівняно з її радіусом R , тобто будемо вважати, що $2\delta < \frac{R}{20}$ і менше однієї шостої частки довжини хвилі згину,

тобто $2\delta < \frac{1}{6}\lambda_u$.

Якщо на оболонку діють тільки нормально прикладені до неї збурення, тоді коливальний рух її поверхні буде відображатися системою рівнянь [54, 55, 56]:

$$\begin{aligned} (2\delta E)^{-1} \nabla^4 \gamma - R \frac{\partial^2 W}{\partial z^2} &= 0; \\ R \frac{\partial^2 \gamma}{\partial z^2} + D \nabla^4 W + R^4 m_{II} \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} &= R^4 q_{II}, \end{aligned} \quad (1.20)$$

де W – радіальне пружне зміщення поверхні оболонки; γ – функція напруг; $m_{II} = \rho 2\delta$ – питома маса поверхні; $q_{II} = P_1' - P_3$ – різниця звукових тисків по обидві сторони оболонки; ∇^4 – оператор Лапласа

$$\nabla^4 = \frac{\partial^4}{\partial z^4} + \frac{\partial^4}{\partial \gamma^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial z^2 \partial \gamma^2}$$

у безрозмірних координатах z та φ , які визначають відстань (в частках радіуса R) на рис. 1.4.

Вживши допоміжну функцію Φ [56]

$$W = \nabla^4 \Phi; \quad \gamma = RE 2\delta \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2}, \quad (1.21)$$

приведемо систему (4.20) до одного рівняння –

$$D \nabla^8 \Phi + R^2 2\delta E \frac{\partial^4 \Phi}{\partial z^4} + R^4 m_{II} \nabla^4 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = R^4 q_{II}. \quad (1.22)$$

Припустимо, що на оболонку падає плоска звукова хвиля, напрям розповсюдження якої складає з радіальним напрямком кут θ , а площа падіння і площа шпангоута корпусу утворюють кут ψ (рис. 1.4). Тоді, звуковий тиск в падаючій хвилі на зовнішній поверхні корпусу можна записати наступним чином –

$$P = P_0 \exp i [\omega t - k_0 2\delta (z \sin \theta \sin \psi - \varphi \sin \theta \cos \psi)]. \quad (1.23)$$

Розв'язок рівняння (4.22) шукаємо у вигляді –

$$\Phi = \Phi_0 \exp i [\omega t - k_0 2\delta (z \sin \theta \sin \psi - \varphi \sin \theta \cos \psi)].$$

Якщо не приймати до уваги розсіяння звуку на поверхні оболонкової частини корпусу, тоді, з урахуванням позначень (1.21), пружні переміщення W поверхні в площині шпангоута можна навести наступним чином –

$$W = (P'_1 - P_2) m_{II}^{-1} \omega^{-2} \left(\frac{D \omega^2}{m_{II} c_0^4} \sin^4 \theta + \frac{E 2 \delta}{m_{II} \omega^2 (2 \delta)^2} \sin^4 \psi - 1 \right)^{-1}. \quad (1.24)$$

Припустимо, що опір корпусу симетричним коливанням значно більший опору антисиметричним коливанням, тобто

$$|Z_a| \ll |Z_c|,$$

а вираз (1.16) для звукопроникності перетворимо до виду –

$$\tau_0 = \frac{1}{\left| 1 + Z \frac{\cos \theta}{2 \rho_0 c_0} \right|^2}, \quad (1.25)$$

де імпеданс $Z = \frac{P'_1 - P_2}{i \omega W}$.

Співвідношення (1.25) для пластини може бути практично вжитим і для оболонки [57]. Як походить з виразу (1.24) –

$$\begin{aligned} Z &= i m_{II} \omega \left(1 - \frac{D \omega^2}{m_{II} c_0^4} \sin^4 \theta - \frac{E \cdot 2 \delta}{m_{II} \omega^2 R^2} \sin^4 \psi \right) = \\ &= i m_{II} \omega \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{ep}} \right)^2 \sin^4 \theta - \left(\frac{\omega_{III}}{\omega} \right)^2 \sin^4 \psi \right), \end{aligned} \quad (1.26)$$

де $\omega_{ep} = 2\pi f_{ep}$; $\omega_{III} = \frac{c_1}{R}$ – колова частота власних, суто радіальних,

коливань кільця, які виникають при стисненні-розтяганні, при цьому довжина колової хвилі λ_{II} стає рівною до довжини кола кільця ($c_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ –

швидкість колової хвилі) якщо кут $\psi = \frac{\pi}{2}$ рад.

Величина звукопроникності циліндричної оболонки буде

$$\tau = \left[\left| 1 + \frac{i}{\Delta_{\Pi}} \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{cp}} \right)^2 \sin^4 \theta - \left(\frac{\omega_{III}}{\omega} \right)^2 \sin^4 \psi \right] \right|^2 \right]^{-1}, \quad (1.27)$$

$$\text{де } \Delta_{\Pi} = \frac{2\rho_0 c_0}{m_{\Pi} \omega \cos \theta}.$$

За нескінченно великого радіуса кривизни оболонки, вираз (1.27) переходить у формулу (1.16).

З виразу (1.27) походить також, що *звукопроникність корпусу може різко знижуватися також на низьких частотах, тобто нижчих за f_{cp} , на відміну від наближеної розрахункової моделі у вигляді пластини – формула (1.17).*

Так, якщо $\omega < \omega_{cp}$, тоді перший доданок у формулі (1.27) стає нескінченно малим в порівнянні з одиницею. Відтоді, за виконання умови

$$\omega = \omega_{III} \sin^2 \psi, \quad (1.28)$$

оболонкова частина корпусу стане “*акустично прозорою*” (звісно, за відсутності втрат). Цю умову можна розглядати також як *рівність сліду довжини кола шпангоута і довжини колової хвилі на площину, що паралельна до фронту падаючої плоскої хвилі* (рис. 1.5) –

$$\frac{2\pi R}{\sin \psi} = \lambda_{\Pi} \sin \psi. \quad (1.29)$$

Таким чином, в циліндричному корпусі виникає на низьких частотах ще одне хвильове співпадання, порівняно з пластиною, для *колових (поздовжніх) хвиль*.

Цікаво, що хвильове співпадання для *згинних хвиль* може виникати тільки на частотах вищих за f_{cp} , а для *колових (поздовжніх) хвиль*, навпаки, може виникати тільки при частотах, які не вищі за ω_{III} .

Якщо докладніше, то в оболонці може мати місце ще одне співпадання – *комбіноване*. Це походить з формули (1.27) –

$$\left(\frac{\omega}{\omega_{ep}}\right)^2 \sin^4 \theta + \left(\frac{\omega_{III}}{\omega}\right)^2 \sin^4 \psi = 1. \quad (1.30)$$

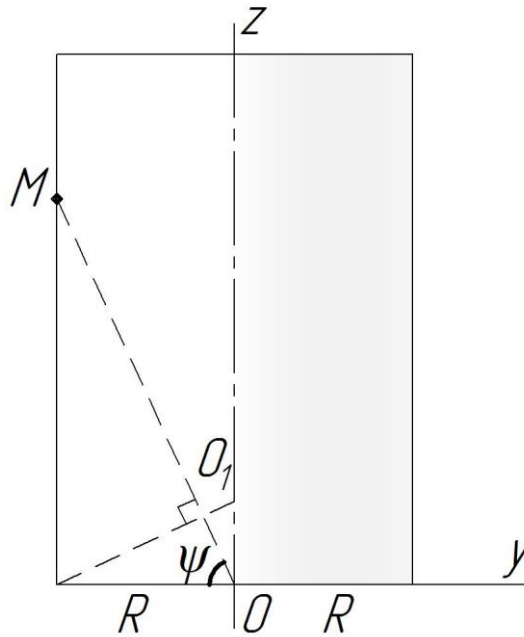


Рис. 1.5. Хвильове співпадання в корпусі ДУСУ для колових хвиль:

$$\omega < \omega_{ep}$$

За впливу дифузного звукового поля, коефіцієнт звукопроникності корпусу приладу визначається за допомогою осереднення по Перісу, тобто

$$\tau_{\theta\psi} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \tau \sin 2\theta \partial\theta \partial\psi, \quad (1.31)$$

де величина τ обчислюється за формулою (1.27). Інтегруючи цей вираз, доцільно вивчати відокремлено діапазони частот. Наприклад, так:

$$1) \omega < \omega_{III}; \quad \omega < \omega_{ep}; \quad 2) \omega_{ep} < \omega < \omega_{III}; \quad 3) \omega_{III} < \omega; \quad \omega_{ep} < \omega.$$

Завдяки використанню наближеної (плоскої) розрахункової моделі, вдається виявити, що згинні коливання корпусу ($Z_a \ll Z_c$) здатні формувати хвильове співпадання тільки на частотах ω , що **перевищують граничну частоту ω_{ep}** . Причому, кожній частоті відповідає свій кут співпадання θ_c .

Уточнена розрахункова модель (у вигляді оболонки) дозволила виявити додатково ще один резонанс для колової (поздовжньої) хвилі ($Z_c \ll Z_a$) у

вигляді збігу сліду довжини кола шпангоута і сліду довжини поздовжньої хвилі. Причому, обидва ці резонанси можуть проявлятися на частотах **нижче граничної**, тобто

$$\begin{aligned}\omega &\ll \omega_{ep} = 33881 \text{ рад } c^{-1} \quad (f_{ep} = 5395 \text{ Гц}); \\ \omega &\ll \omega_{III} = 251998 \text{ рад } c^{-1} \quad (f_{III} = 40127 \text{ Гц}).\end{aligned}\quad (1.32)$$

де $\omega_{ep} = 2\pi f_{ep}$; $\omega_{III} = \frac{c_1}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$; c_1 – швидкість колових (поздовжніх) хвиль; ω_{III} – радіальні власні коливання кільця шпангоута ($Z_c \ll Z_a$).

Для умов попереднього прикладу, тобто приймаючи радіус корпусу R рівним 2,5 см, а швидкість колової (поздовжньої) хвилі в дюралюмінії рівною $c_1 = 6300 - 5230 \text{ мс}^{-1}$, можна встановити умови виникнення резонансу поздовжньої хвилі в корпусі.

Перш за все, з'ясуємо граничну частоту:

$$f_{ep} = \frac{c_1}{2\pi R} = \frac{6300}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,025} = 40127,39 \text{ (Гц)} = 40,127 \text{ кГц}.$$

Значення кута ψ , за котрого настапує явище хвильового співпадання на низьких частотах, обчислюємо за формулою (1.29) і, для зручності, зведемо в табл. 1.1.

З метою з'ясування особливостей розвитку у часі резонансного явища була створена програма обчислень резонансного кута ψ між поздовжньою віссю корпусу і хвильовим вектором [Додаток Б-10]. Результати зміни резонансних значень кута ψ в залежності від частоти колової хвилі f наведений в аналоговій формі, дані свідчать про те, що ріст частоти проникаючого випромінювання породжує ріст значень резонансного кута ψ .

Таблиця 1.1

Резонансні значення кута ψ для поздовжньої хвилі

Дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$			
$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$
50	2°01'	1000	9°45'
100	2°52'	1500	11°42'
150	3°30'	2000	13°17'
200	4°03'	3000	16°09'
250	4°32'	4000	18°39'
300	4°58'	6000	22°57'
350	5°44'	8000	26°48'
400	6°25'	10000	30°12'
450	6°44'	15000	37°51'
500	7°02'	20000	44°55'
600	7°36'	25000	52°08'
700	8°22'	30000	59°52'
800	8°51'	35000	69°06'
900	9°19'	40000	87°02'

Таким чином, при зменшенні кута ψ падіння хвилі, знижується і частота, на якій проявляється ефект співпадання, тобто:

$$2\pi R \frac{f}{c_1} = \sin^2 \psi .$$

1.3. Умови формування комбінованого резонансу в підвісі гіроскопа

За алгоритм практичного окреслення виникнення і структури комбінованого резонансу в підвісі гіроскопа оберемо найважливішу в спектрі вивчаємих задач характеристику функціональної спроможності двостепеневого поплавкового гіроскопа в експлуатаційних умовах, а саме *звукопроникність* акустичного випромінювання крізь корпус приладу.

Здійснимо чисельну оцінку спільного впливу значень кутів співпадання θ і ψ для наближеної розрахункової моделі (за умови великого хвильового розміру).

Оцінку ступеню впливу кутів співпадання θ і ψ проведемо для наступних умов: 1) коли частота акустичного випромінювання менше за граничну $f < f_{ep}$; 2) більше за граничну $f_{ep} < f$.

Виконуючи кількісний аналіз, окреслимо наступні числові значення, які містяться в робочій формулі для розрахунку звукопроникності циліндричної оболонки (1.27):

$\rho = 2700 \text{ кгм}^{-3}$ – густина матеріалу корпусу;

$c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$ – швидкість колової (поздовжньої) хвилі в дюралюмінії; $m_{II} = 5,4 \text{ Нс}^2$ – питома маса;

$\omega = 2\pi f$ – частота акустичного випромінювання;

$\omega_{ep} = 2\pi f_{ep} = 33881 \text{ рад с}^{-1}$ – гранична частота;

$\omega_{III} = \frac{c_1}{R} = 252000 \text{ рад с}^{-1}$ – радіальні власні коливання кільця

шпангоута.

Програма обчислень звукопроникності корпусу поплавкового гіроскопа класу ДУСУ2 має вигляд:

$$\tau = \left[\left[1 + \frac{i}{\Delta_{II}} \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_{ep}} \right)^2 \sin^4 \theta - \left(\frac{\omega_{III}}{\omega} \right)^2 \sin^4 \psi \right] \right]^2 \right]^{-1}$$

$$\rho := 2700 \quad c = 6300 \quad m_{II} := 5.4$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f \quad f := 100..56000$$

$$\omega_{gr} := 33881 \quad \omega_{pp} := 252000$$

```

τ := | ρ ← 2700
      c ← 6300
      f ← 1500
      ω ← 2 · π · f
      mp ← 5.4
      ωgr ← 33881
      ωpp ← 252000
      ψ ← asin[ [ 2π · 0.025 · (f/c) ]0.5 ]
      θmin ← 0
      θmax ← 90
      for i ∈ 0..θmax
        | θi ← θmin + i · π / 180
        | Δi ← (2 · ρ · c) / (mp · ω · cos(θi))
        | τi ← [ [ 1 + (1/Δi) · [ 1 - (ω/ωgr)2 · (sin(θi))4 - (ωpp/ω)2 · (sin(ψ))4 ] ]2 ](-1)
      τ

```

Частота акустичного випромінювання менше за граничну частоту $f < f_{cp}$. Для початку розглянемо інтервал частот акустичного випромінювання f , що нижче за граничну $f_{cp} = 5395 \text{ Гц}$. Числовий аналіз показує, що зі збільшенням частоти f в діапазоні значень від 100 Гц до 1600 Гц спостерігається повільний ріст величини кута співпадання ψ , а за умови формування комбінованого резонансу звукопроникність корпусу гіроскопа може сягати значень $\tau = 10^{15} - 10^{16}$. Такий рівень звукопроникності свідчить про те, що взаємодія проникаючого акустичного випромінювання з оболонковим фрагментом корпусу приладу здійснюється за відсутності дисипації енергії звукових хвиль, тобто має місце безперешкодне проходження звукових хвиль ззовні усередину поплавкового гіроскопа, що

прийнято іменувати “акустичною прозорістю” фрагмента підвісу [Додаток Б-11 – Додаток Б-14].

Результати обчислень звукопроникності корпусу приладу для частоти акустичного випромінювання $f = 1250 \text{ Гц}$, де досягається її максимальне значення представлено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2-30В в залежності від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 1250 \text{ Гц}$, $\psi = 70,1^\circ$.

$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	$1,57 \cdot 10^5$	12,5	$2,22 \cdot 10^3$	25	$1,20 \cdot 10^2$
0,5	$1,62 \cdot 10^5$	13	$1,86 \cdot 10^3$	25,5	$1,10 \cdot 10^2$
1	$1,78 \cdot 10^5$	13,5	$1,58 \cdot 10^3$	26	$1,02 \cdot 10^2$
1,5	$2,10 \cdot 10^5$	14	$1,35 \cdot 10^3$	26,5	94,62
2	$2,73 \cdot 10^5$	14,5	$1,16 \cdot 10^3$	27	87,77
2,5	$4,05 \cdot 10^5$	15	$9,99 \cdot 10^2$	27,5	81,53
3	$7,55 \cdot 10^5$	15,5	$8,68 \cdot 10^2$	28	75,85
3,5	$2,33 \cdot 10^6$	16	$7,58 \cdot 10^2$	28,5	70,66
4	$3,68 \cdot 10^{16}$	16,5	$6,66 \cdot 10^2$	29	65,92
4,5	$3,13 \cdot 10^6$	17	$5,87 \cdot 10^2$	29,5	61,57
5	$6,01 \cdot 10^5$	17,5	$5,19 \cdot 10^2$	30	57,58
5,5	$2,29 \cdot 10^5$	18	$4,62 \cdot 10^2$	30,5	53,91
6	$1,14 \cdot 10^5$	18,5	$4,12 \cdot 10^2$	31	50,54
6,5	$6,51 \cdot 10^4$	19	$3,69 \cdot 10^2$	31,5	47,43
7	$4,09 \cdot 10^4$	19,5	$3,31 \cdot 10^2$	32	44,56
7,5	$2,73 \cdot 10^4$	20	$2,98 \cdot 10^2$	32,5	41,91
8	$1,91 \cdot 10^4$	20,5	$2,69 \cdot 10^2$	33	39,45
8,5	$1,39 \cdot 10^4$	21	$2,44 \cdot 10^2$	33,5	37,18
9	$1,04 \cdot 10^4$	21,5	$2,21 \cdot 10^2$	34	35,07
9,5	$7,94 \cdot 10^3$	22	$2,01 \cdot 10^2$	34,5	33,11
10	$6,19 \cdot 10^3$	22,5	$1,84 \cdot 10^2$	35	31,29
10,5	$4,92 \cdot 10^3$	23	$1,68 \cdot 10^2$	35,5	29,59
11	$3,96 \cdot 10^3$	23,5	$1,54 \cdot 10^2$	36	28,01
11,5	$3,23 \cdot 10^3$	24	$1,41 \cdot 10^2$	36,5	26,54
12	$2,66 \cdot 10^3$	24,5	$1,30 \cdot 10^2$	37	25,17

Продовження таблиці 1.2

θ , град	τ	θ , град	τ	θ , град	τ
37,5	23,88	55,5	5,35	73,5	1,95
38	22,68	56	5,18	74	1,91
38,5	21,55	56,5	5,01	74,5	1,87
39	20,50	57	4,85	75	1,82
39,5	19,51	57,5	4,70	75,5	1,78
40	18,58	58	4,55	76	1,74
40,5	17,70	58,5	4,41	76,5	1,70
41	16,88	59	4,28	77	1,67
41,5	16,11	59,5	4,15	77,5	1,63
42	15,38	60	4,02	78	1,60
42,5	14,70	60,5	3,90	78,5	1,56
43	14,05	61	3,79	79	1,53
43,5	13,44	61,5	3,68	79,5	1,50
44	12,86	62	3,57	80	1,47
44,5	12,32	62,5	3,47	80,5	1,44
45	11,80	63	3,37	81	1,41
45,5	11,31	63,5	3,27	81,5	1,38
46	10,85	64	3,18	82	1,35
46,5	10,41	64,5	3,10	82,5	1,32
47	10,00	65	3,01	83	1,30
47,5	9,60	65,5	2,93	83,5	1,27
48	9,23	66	2,85	84	1,25
48,5	8,87	66,5	2,78	84,5	1,22
49	8,54	67	2,70	85	1,20
49,5	8,21	67,5	2,63	85,5	1,18
50	7,91	68	2,56	86	1,16
50,5	7,62	68,5	2,50	86,5	1,13
51	7,34	69	2,44	87	1,11
51,5	7,08	69,5	2,37	87,5	1,09
52	6,83	70	2,32	88	1,07
52,5	6,59	70,5	2,26	88,5	1,05
53	6,36	71	2,20	89	1,04
53,5	6,14	71,5	2,15	89,5	1,02
54	5,93	72	2,10	90	1,00
54,5	5,73	72,5	2,05		
55	5,54	73	2,00		

Залежність звукопроникності корпусу ДУСУ2-30В від кута співпадання θ за умови прояву комбінованого резонансу зображено на рис. 1.6.

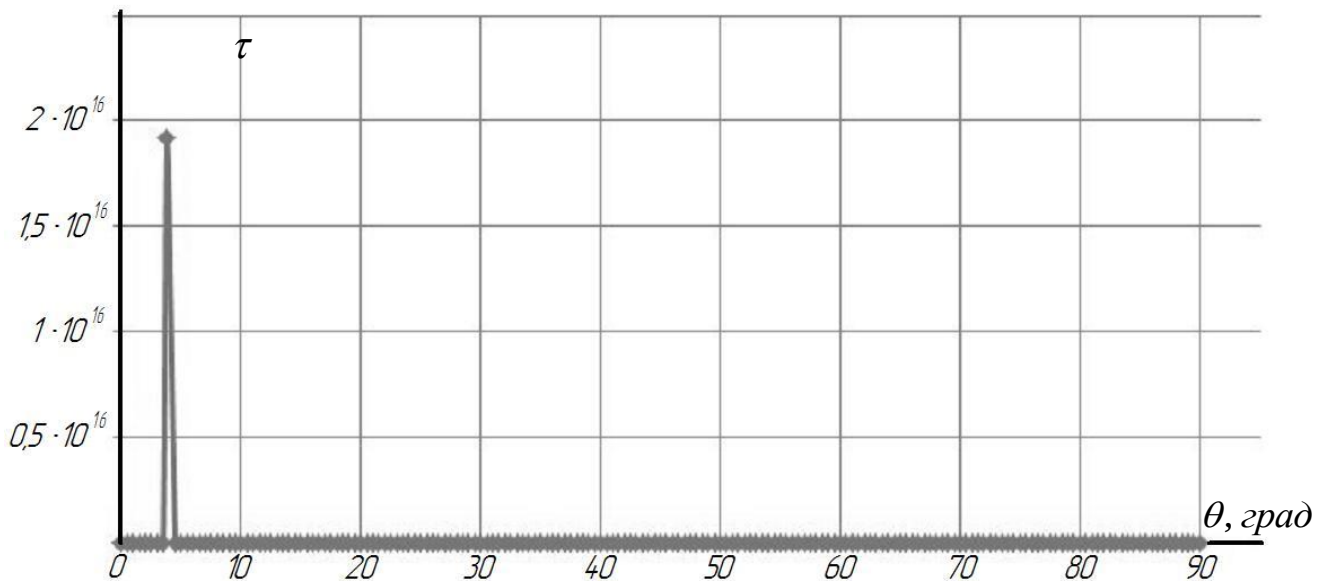


Рис. 1.6. Звукопроникність корпусу ДУСУ2-30В в залежності від кута співпадання θ : $f = 1250 \text{ Гц}$, $\psi = 70,1^\circ$.

Частота акустичного випромінювання більше граничної частоти $f_{\text{гр}} < f$. З результатів обчислень видно, що за значень частоти випромінювання f в діапазоні від 5400 Гц до 46800 Гц звукопроникність корпусу ДУСУ2-30В набуває величин $\tau = 10 - 10^4$, що значно менше за величину тау в 10^{16} , і таким чином, носить демонстраційний характер. Подальше збільшення частоти акустичного випромінювання, до значення 46900 Гц відбувається формування комбінованого резонансу, коли звукопроникність корпусу гіроскопа досягає значень $\tau = 10^{14} - 10^{16}$, що знову ж таки свідчить про настання “акустичної прозорості” корпусу приладу [Додаток Б-15 – Додаток Б-17].

Розглянемо значення звукопроникності корпусу приладу, коли досягається її максимальне значення за частоти акустичного випромінювання $f = 52500 \text{ Гц}$, результати представлено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2-30В в залежності від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 52500 \text{ Гц}$, $\psi = 31,2^\circ$.

$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	0,907	15,5	0,954	31	1,806
0,5	0,907	16	0,960	31,5	1,888
1	0,907	16,5	0,967	32	1,978
1,5	0,907	17	0,974	32,5	2,077
2	0,907	17,5	0,982	33	2,186
2,5	0,907	18	0,991	33,5	2,308
3	0,907	18,5	1,000	34	2,443
3,5	0,907	19	1,011	34,5	2,593
4	0,907	19,5	1,022	35	2,762
4,5	0,907	20	1,034	35,5	2,952
5	0,908	20,5	1,047	36	3,166
5,5	0,908	21	1,062	36,5	3,409
6	0,908	21,5	1,077	37	3,686
6,5	0,909	22	1,094	37,5	4,003
7	0,909	22,5	1,112	38	4,368
7,5	0,910	23	1,132	38,5	4,792
8	0,911	23,5	1,154	39	5,288
8,5	0,912	24	1,177	39,5	5,871
9	0,913	24,5	1,202	40	6,564
9,5	0,914	25	1,229	40,5	7,395
10	0,916	25,5	1,258	41	8,404
10,5	0,918	26	1,290	41,5	9,643
11	0,920	26,5	1,324	42	11,187
11,5	0,922	27	1,361	42,5	13,145
12	0,925	27,5	1,402	43	15,675
12,5	0,928	28	1,446	43,5	19,021
13	0,931	28,5	1,493	44	23,570
13,5	0,935	29	1,545	44,5	29,969
14	0,939	29,5	1,602	45	39,358
14,5	0,943	30	1,664	45,5	53,914
15	0,948	30,5	1,732	46	78,207

Продовження таблиці 1.3

$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
46,5	$1,23 \cdot 10^2$	61,5	6,693	76,5	$1,97 \cdot 10^3$
47	$2,21 \cdot 10^2$	62	6,559	77	$2,40 \cdot 10^4$
47,5	$5,03 \cdot 10^2$	62,5	6,462	77,5	$7,55 \cdot 10^2$
48	$2,03 \cdot 10^3$	63	6,402	78	$2,21 \cdot 10^2$
48,5	$8,74 \cdot 10^{16}$	63,5	6,376	78,5	$1,02 \cdot 10^2$
49	$2,08 \cdot 10^3$	64	6,386	79	57,762
49,5	$5,29 \cdot 10^2$	64,5	6,431	79,5	36,721
50	$2,39 \cdot 10^2$	65	6,513	80	25,182
50,5	$1,37 \cdot 10^2$	65,5	6,634	80,5	18,215
51	88,929	66	6,799	81	13,709
51,5	62,936	66,5	7,012	81,5	10,640
52	47,179	67	7,279	82	8,463
52,5	36,901	67,5	7,611	82,5	6,869
53	29,824	68	8,017	83	5,670
53,5	24,743	68,5	8,513	83,5	4,747
54	20,973	69	9,121	84	4,024
54,5	18,100	69,5	9,866	84,5	3,448
55	15,863	70	10,789	85	2,983
55,5	14,089	70,5	11,941	85,5	2,602
56	12,661	71	13,399	86	2,288
56,5	11,498	71,5	15,276	86,5	2,025
57	10,542	72	17,744	87	1,803
57,5	9,749	72,5	21,078	87,5	1,615
58	9,087	73	25,735	88	1,454
58,5	8,533	73,5	32,526	88,5	1,316
59	8,069	74	43,012	89	1,196
59,5	7,680	74,5	60,517	89,5	1,091
60	7,355	75	93,230	90	1,000
60,5	7,087	75,5	$1,66 \cdot 10^2$		
61	6,868	76	$3,92 \cdot 10^2$		

Залежність звукопроникності корпусу ДУСУ2-30В від кута співпадання θ при частоті акустичного випромінювання $f = 52500 \text{ Гц}$ за умови формування комбінованого резонансу зображено на рис. 1.7.

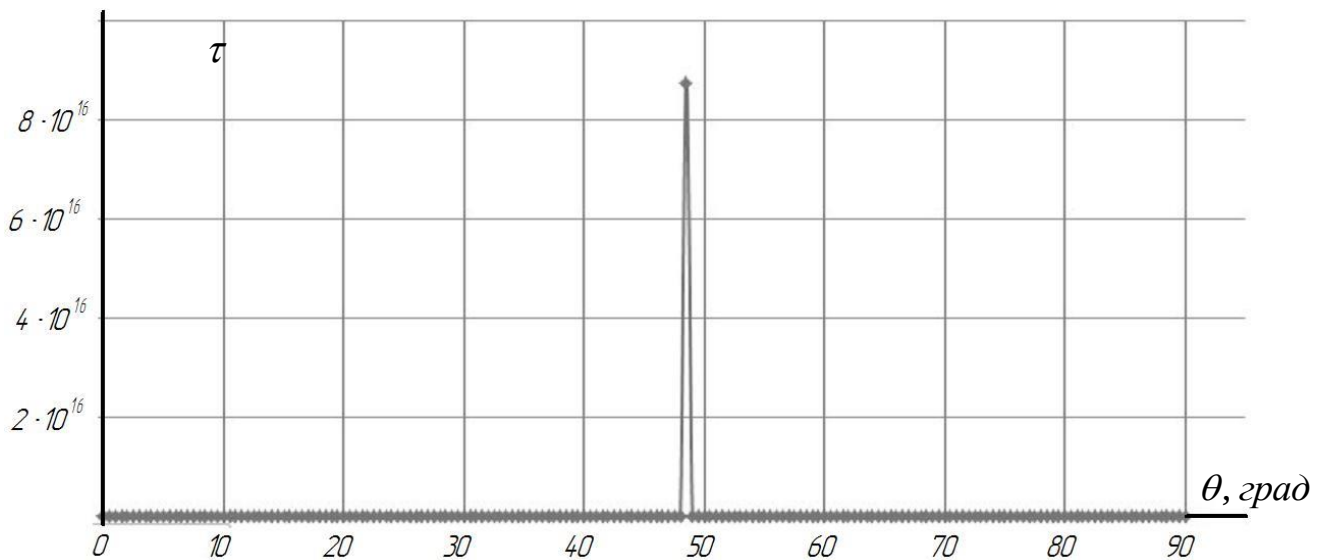


Рис. 1.7. Звукопроникність корпусу ДУСУ2-30В в залежності від кута співпадання θ : $f = 52500 \text{ Гц}$, $\psi = 31,2^\circ$.

Висновки до розділу 1

1. Побудовані розрахункові схеми пружної взаємодії проникаючого акустичного випромінювання з поплавковим гіроскопом класу ДУСУ2-30В надають можливість для поглибленого аналізу окреслення небезпечної зони резонансних проявів в поліагрегатному підвісі гіроскопа. Вивчення явища за умови детального розгляду окремих частотних зон акустичного випромінювання – вищих за граничну $f_{gp} < f$ та нижчих за граничну $f < f_{gp}$, та наявної значної величини хвильового розміру корпусу приладу дозволили детально проаналізувати умови виникнення локальних особливостей в підвісі гіроскопа в експлуатаційних умовах. При невеликому антисиметричному імпедансі $Z_a \ll Z_c$ резонансні явища формуються згинними коливаннями корпусу і досягають своїх максимальних значень при кутах співпадання $\theta_c = 21^\circ 07'$, а при незначному симетричному імпедансі $Z_c \ll Z_a$ хвильове співпадання (геометричний резонанс) формується коловими хвилями при значеннях кута співпадання $\theta_c = 3^\circ 41'$. Явище відкрите Кремером для наближеної розрахункової моделі у вигляді нескінченної за протяжністю пластини.

2. Побудована уточнена розрахункова модель, для незначного хвильового розміру, надала можливість виявити небезпеку прояву резонансних явищ за умови коли слід кола шпангоута корпусу на площину паралельною фронту плоскої хвилі дорівнює сліду колової хвилі. Експериментальним шляхом визначено найбільш небезпечне значення кута $\psi = 87^{\circ}02'$ для частоти акустичного випромінювання $f = 40 \text{ кГц}$.

3. Створено програму обчислень звукопроникності корпусу в середовищі MathCad. Для чисельних характеристик серійного двостепеневого поплавкового гіроскопа класу ДУСУ2-30В експериментальним шляхом визначено наявність ще одного – комбінованого резонансу, коли звукопроникність корпусу стрімко збільшується в залежності від кутів співпадання θ та ψ . Результат обчислень можна розглядати як встановлені причини небажаного набуття певних значень кутів θ та ψ , що призводить до нескінченно малої дисипації енергії падаючої звукової хвилі і виникнення, в наслідок цього, явища “акустичної прозорості” корпусу з усіма наступними негативними проявами у поліагрегатному підвісі гіроскопа та збільшення похибок вимірювань приладу. Для частот падаючої хвилі менше за граничну $f < f_{gp}$, при частоті акустичного випромінювання $f = 1250 \text{ Гц}$, при значеннях кутів співпадання $\theta = 4,07^{\circ}$ та $\psi = 70,1^{\circ}$, досягається значення звукопроникності оболонкової частини корпусу $\tau = 3,68 \cdot 10^{16}$. Для частот падаючої хвилі більших за граничну $f_{gp} < f$, за частоти випромінювання $f = 52500 \text{ Гц}$, значення кутів співпадання $\theta = 48,5^{\circ}$ та $\psi = 31,2^{\circ}$, звукопроникність частин корпусу сягає значень $\tau = 8,74 \cdot 10^{16}$.

РОЗДІЛ 2. БУФЕРНА ЗОНА. ШТУЧНА ДИСИПАЦІЯ ЕНЕРГІЇ ПРОНИКАЮЧОГО АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

2.1. Методи і засоби звуко- і віброізоляції бортової апаратури

Шумозахисні заходи, як правило, розглядаються вже на етапі проектування виробничих будівель, споруд, технологічних процесів, а також машин і механізмів. Причому, чітко розмежовуються методи і засоби індивідуального та колективного захисту людей від акустичних та вібраційних навантажень і заходи щодо шумозахисту обладнання [56].

Санітарні норми звуко- і вібраційних навантажень в будівництві значно нижче норм, встановлених для чутливої радіоелектронної апаратури та вимірювальної техніки. При підвищених значеннях акустичних впливів (більше 150 дБ) комплектуючі елементи приладів припиняють нормально функціонувати або внаслідок незворотних змін в матеріалі елементів, або внаслідок порушення механічних властивостей місць їх кріплення (в першу чергу - в місцях пайки). Робота людей в таких умовах без заходів захисту неможлива. Підвищені рівні вібрації також негативно позначаються як на обслуговуючий персонал (виникнення професійних захворювань), так і на функціонуванні обладнання.

Засоби захисту по відношенню до джерела шуму поділяють на понижуючі шум у місці його виникнення і на шляху його передачі до захищаючого об'єкта. Залежно від принципу дії вони можуть бути демпфуючими, ізолюючими, що поглинають і шумоглушники. З точки зору емісії найбільш шумонебезпечними, перш за все, є всі види ручних машин, а також копрове і подібне йому обладнання.

Для підвищення ефективності боротьби з шумом треба, перш за все, з'ясувати його природу, встановити якісний і кількісний потенціали і найхарактерніші риси амплітудно- і фазово-частотного складів. Це

неможливо виконати в повному обсязі, якщо процес шумоутворення розглядати як детермінований. Тому необхідний імовірнісний підхід до аналізу структури процесів звуко- і вібронавантаження.

Методи боротьби з шумом і вібрацією згрупуємо за трьома основними напрямками: пасивні, активні і компенсаційні.

Перша група - це методи конструктивно-технологічних удосконалень, що дозволяють зменшити вплив звуку і вібрації без додаткових джерел енергії і не потребують інформації про характер збурюючого поля [57].

Друга група включає в себе методи, засновані на використанні зовнішньої інформації та додаткових джерел енергії, що дозволяють компенсувати механічне збурення (звукове або кінематичне).

Третя група складається з методів, заснованих на компенсації прояву вібро- і акустичних збурень, і не потребують зовнішніх джерел енергії та інформації про характер зовнішнього впливу.

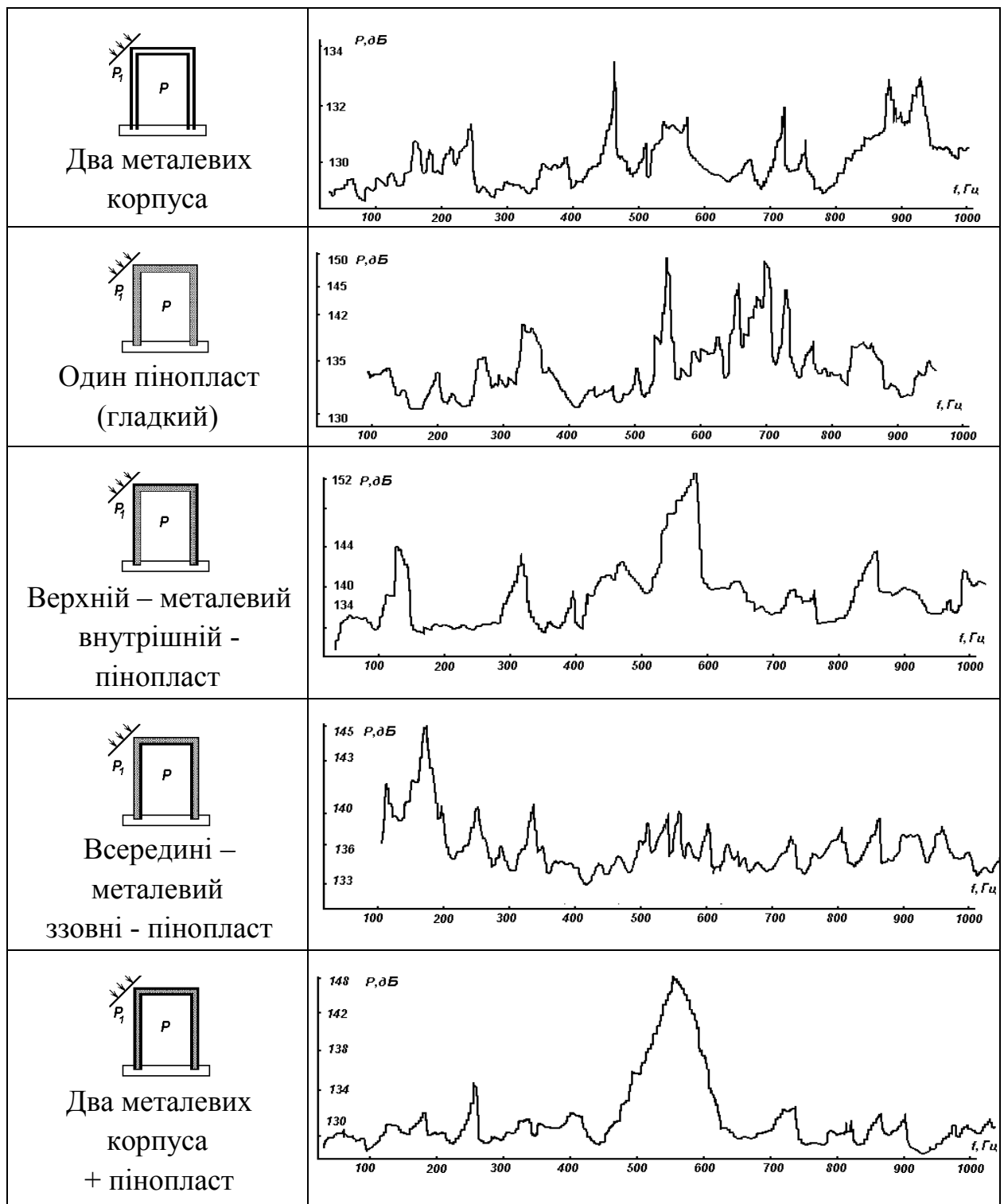
Розглянемо результати стендових випробувань котрі переконливо довели, що пасивні методи звукоізоляції дозволяють істотно знизити рівень шуму всередині приладу, з одного боку, і перерозподілити середню енергію надлишкового тиску уздовж осі частот, з іншого боку (табл. 2.1). Дослідження проводилися при рівні зовнішнього випромінювання $P_1 = 163$ дБ [58].

Таблиця 2.1.

Звуковий тиск всередині приладу при різних схемах пасивної звукоізоляції



Продовження таблиці 2.1.



Наявність піків говорить про переважну присутність частот пройдешнього всередину звукового випромінювання (або смуги). Для оцінки ефективності шумогасіння використовувалися пористі конструкції (рис. 2.1: а - суцільний екран; б - екран з порожнинами типу резонатора Гельмгольца),

перфорований з похилими насічками (рис. 2.2), а також перфорований з поздовжніми насічками і суцільний (рис. 2.3).

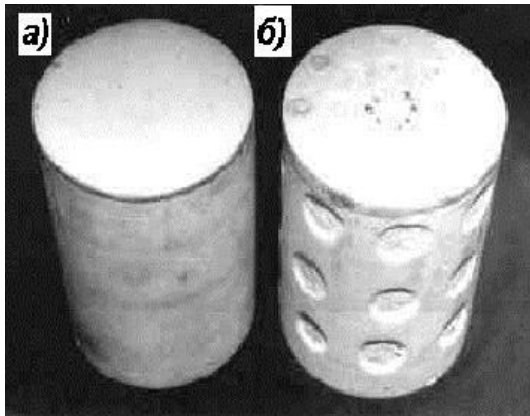


Рис. 2.1. Пористий екран:
а) суцільний; б) з резонансними порожнинами



Рис. 2.2. Перфорований екран з похилою перфорацією

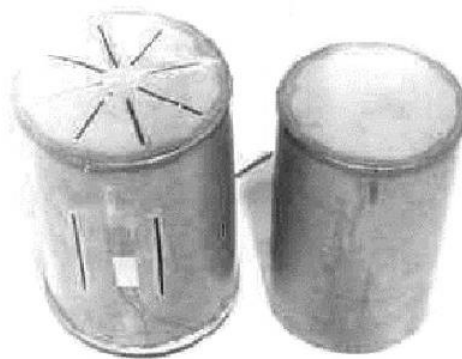


Рис. 2.3. Екрануючий кожух: а) з повздовжньою перфорацією; б) суцільний

Характер і ступінь акустичного впливу, так само як і механічна модель збуреного руху, залежать від співвідношення габаритів виробу і половини довжини звукової хвилі. Якщо ця величина знаходиться в межах одиниці, то акустичне навантаження може бути прирівняне до рівномірно розподіленого, а механічна модель - до твердого тіла на пружних зв'язках. Якщо ж габаритний розмір в кілька разів перевищує половину довжини акустичної хвилі, то звукове навантаження повинно розглядатися як хвильовий вплив, а вся конструкція - як система з розподіленими параметрами [56].

Приведено ілюстрацію можливості зменшення рівня звукового впливу всередині заданого обсягу за допомогою пристрою, що відповідає вимогам, що пред'являються і позбавленого недоліків відомих методів і засобів. Це пристрій являє собою систему з двох коаксіальних циліндрів, виконаних для конкретності досліджень в тому ж габаритному виконанні, що і серійний прилад.

Пристрій кріпиться до важкої (щоб виключити перекачування енергії) основи, по краях якого знаходяться два півкільця для підвісу випробуваного виробу всередині ревербераційної камери з метою виключення впливу стін і підлоги установки на чистоту експерименту. У місці кріплення до основи встановлюється прокладка з пружного матеріалу для придушення взаємовпливу циліндрів і підстави.

Рівень звуку усередині пристрою вимірювався п'єзокерамічним датчиком звукового тиску типу ЦПД-10А, розробленим ЦАГІ. Датчик має невеликі габаритні розміри, що практично виключило його вплив на структуру акустичного поля. Інтенсивність звуку вимірювалася вольтметром типу ВЗ-20 по сигналу датчика звукового тиску. Вхідний опір вольтметра вище 1 МОм, що дозволило використовувати його як вимірювальний прилад при роботі з п'єзокерамічним приймачем.

Деформації торцевої і бічних поверхонь звукоізолюючого циліндра вимірювалася тензорезисторами марки 2ПКБ-10.100в, ТУ 2506.1382.78, сигнали яких надходили на тензопідсилювач типу 8.АНЧ-7М.

Пристрій містить коаксіально розташовані внутрішній металевий циліндр 1 і зовнішній циліндр 2 (перфорований екран), що має рівну

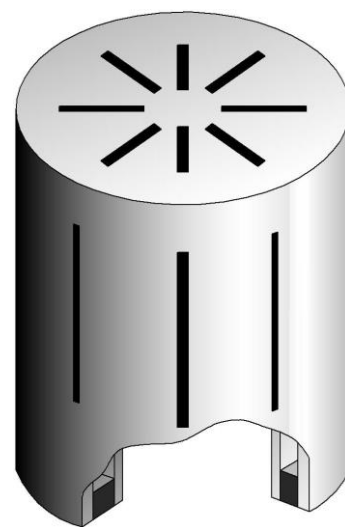


Рис. 2.4. Пристрій для зменшення рівня інтенсивного аеродинамічного шуму у вигляді системи двох коаксіальних циліндрів.

кількість поздовжніх 3 на бічній поверхні і радіальних 4 на торцевій поверхні 5 наскрізних щілин заданих типорозмірів (рис. 2.4). Обидва циліндра розділені повітряним простором.

У місці кріплення пристрою до основи між ними встановлена прокладка 6 з великим коефіцієнтом внутрішнього поглинання, наприклад, гумова. При впливі інтенсивного звукового тиску на зовнішній циліндр 2, близько 5 ... 7%, в залежності від сумарної площі щілин, звукової енергії випромінювання проходить крізь щілини 3 і 4 і потрапляє безпосередньо на поверхню внутрішнього циліндра 1. Далі, частина цієї енергії передається всередину циліндра, а інша, відбиваючись, потрапляє на внутрішню поверхню зовнішнього циліндра, створюючи тим самим з цього боку протитиск інтенсивному аеродинамічному шуму. Це призводить до того, що істотно знижує рівень шуму всередині пристрою. Діаграма звукового тиску представлена на рис. 2.5 – лінія 2. Максимальне зниження рівня шуму в такій конструкції, як видно, знижується до 114 дБ, а в середньому, на всьому частотному діапазоні - до 116 дБ, за винятком локальних екстремумів. Таким чином, даний пристрій дозволяє, по суті справи, забезпечити у внутрішньому об'ємі приладу *акустичний комфорт*.

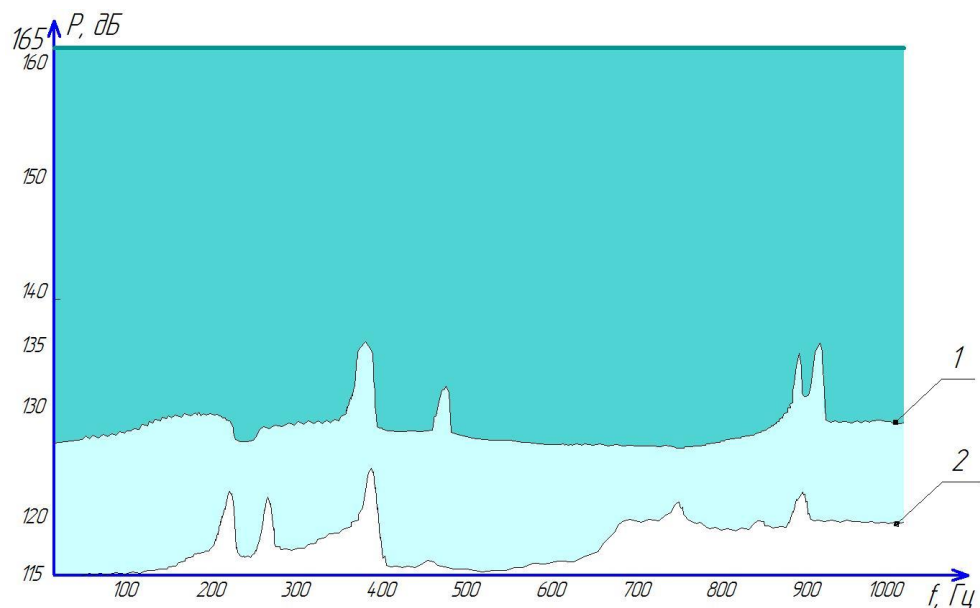


Рис. 2.5. Звукоізоляція за допомогою двох коаксіальних циліндрів: суцільних – 1; зовнішній з повздовжніми щілинами – 2

Нанесення наскрізних щілин на бічній поверхні зовнішнього циліндра перпендикулярно його твірної і під кутом $\frac{\pi}{4}$ рад істотних переваг в структурі звукового поля всередині заданого обсягу не вносить.

Якщо провести синхронний запис рівня акустичного тиску всередині пристрою для зменшення інтенсивного аеродинамічного шуму і тензометричних вимірювань величин деформацій поверхонь обох циліндрів, то виявиться, що локальні екстремуми на діаграмі акустичного тиску супроводжуються в часі збудженням торцевої поверхні зовнішнього циліндра.

Бічна поверхня циліндрів при цьому не порушується, що пояснюється її досить високою жорсткістю на вигин. Разом з тим, як видно з діаграм, збудження торцевої поверхні внутрішнього циліндра не вносить істотного впливу на рівень акустичного тиску внутрішнього об'єму меншого циліндра, за винятком частоти $f = 350$ Гц, на якій порушуються обидві торцеві поверхні. За допомогою цього явища встановлено можливість коригування діаграми акустичного тиску внутрішнього циліндра за допомогою, наприклад, змінного значення жорсткості торцевої поверхні зовнішнього циліндра. Технічна реалізація цієї умови може бути різною.

Таким чином, найбільш ефективним, з точки зору зниження рівня звукового поля в заданому внутрішньому ревербераційному об'ємі, є система двох коаксіальних кругових циліндрів, внутрішній з яких не перфоровано, а зовнішній має наскрізні щілини заданих типорозмірів (рис. 2.4).

Цей висновок можна поширити також на інші масогабаритні характеристики приладів цього класу.

В гіроскопічних приладах роль внутрішнього циліндра може виконувати власне корпус приладу.

Зовнішній циліндр з прорізами виконує роль перфорованого екрану, акустичні властивості якого, як відомо, оцінюються його опором продування, що має, в загальному, комплексний характер. Для прорізів шириною більше

$1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ дійсною частиною цього опору можна знехтувати і вважати опір екрану чисто уявною величиною, пропорційною приєднаній масі повітря в щілинах.

2.2. Технічна реалізація буферної зони для поплавкового гіроскопа

Раптова зміна тиску повітряного середовища в значній мірі виявляються причиною коливань корпусу льотних виробів і викликають, більшу частину нерегулярних вібрацій фюзеляжу. Випадкові пульсації через нестабільність потоку повітря містять області, що викликають інтенсивні пульсації тиску поблизу льотних виробів.

У разі дії тисків акустичних хвиль, вони переміщуються з місцевою швидкістю звуку по відношенню до навколишнього середовища. Однак, внаслідок руху льотних виробів, швидкість хвиль тиску на поверхні буде визначатися вже сумою місцевої швидкості звуку і швидкості польоту. І оскільки остання сильно змінюється, а звукові хвилі підходять до льотного виробу під різними кутами, то стає очевидним, що швидкість переміщення хвиль тиску щодо корпусу льотного виробу може приймати безліч значень.

2.2.1. Дифракція звукових хвиль на підвісі гіроскопа

З'ясовується природа пружної взаємодії ультразвукового променя з металевою втулкою у вигляді двох однакової довжини і різних радіусів оболонок, з'єднаних на торцях плоскими кільцями, внутрішній проміжок між якими заповнений рідиною [59]. Аналізуються умови випромінювання поверхнею зовнішньої оболонки у рідину звукових хвиль і формування на їх основі зони підвищеної енергетики, турбулентної за структурою. Окреслюються умови випромінювання звукових хвиль в міжоболонковий простір з обов'язковим виконанням умови великого хвильового розміру поверхні зовнішньої оболонки. Розкривається структура підвищення енергетичного стану зони каустики, яка виконує функції буферної зони зовнішньому проникаючому акустичному випромінюванню [59].

2.2.2. Напівнатурне дослідження дії проникаючого акустичного випромінювання

Метою досліджень обрано напівнатурну реалізацію пропонуємого технічного рішення з використанням серійно виготовляємого двостепеневого гіроскопічного приладу класу ДУСУ2 і порівняльний аналіз похибок приладу в акустичному середовищі без буферної зони і з штучно формуємою буферною зоною на резонансному рівні хвильового співпадання.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі задачі:

1. Побудова розрахункової моделі явища за умови великого хвильового розміру зовнішньої оболонки.
2. Експериментальне дослідження величину зсуву нуля приладу для найбільш чутливого кута падіння випромінювання і виникаючому при цьому похибки вимірювань приладу.
3. Експериментальне дослідження додаткової похибки приладу за умови штучного формування буферної зони за допомогою ультразвукового випромінювача.
4. Дослідження кута падіння ультразвукового випромінювача, за якого проявляється максимальна ефективність буферної зони. Обчислюється зсув нуля приладу і похибка приладу за наявної, штучно формуємої, буферної зони.

2.2.3. Аналіз стану вивчаємої проблеми

В роботі [60] розкривається природа прояву резонансних явищ в підвісі поплавкового двостепеневого гіроскопа в звукових полях гіперзвукового польоту, яка побудована на критичній зміні звукопроникності корпусу приладу.

Експериментальне дослідженні турбулентного течії з відкритим каналом між двома вбудованими напівсферичними перешкодами на поверхні в тандемному розташуванні наведено в роботі [61]. Серія експериментів виконується при об'єднаному взаємодії хвильового струму з сімома

відносними інтервалами L / h , де L - відстань від центру до центру, а h - висота перешкоди для числа Рейнольдса $Re = 5.88 \times 10^4$. Спостереження в основному зосереджені на Зміни, індуковані в середніх компонентах швидкості, інтенсивності турбулентності і напруга зсуву Рейнольдса через накладення поверхневих хвиль на навколишній потік і порівнюються зі змінами плоскій поверхні і однієї півкулі. У статті також досліджуються домінуючі турбулентні події розриву, які вносять вклад в напругу зсуву Рейнольдса для різної відносної глибини під впливом півкуль.

Звукоізоляція одношарової стінки, обумовлена сферичної хвилею розглядається в роботі [61]. Теоретично аналізується передане звукове поле нескінченної пружної пластини при падінні сферичної хвилі і розглядаються механізми ізоляції. Витіснення пластини формулюється з використанням перетворення Ханкеля в просторі хвильових чисел, а передане звуковий тиск в далекому полі отримано формулою Релея в явній замкнутої формі. Закон маси для падіння сферичної хвилі відрізняється від закону нормального плоского хвилювання: подвоєння ваги стіни або частоти дає збільшення на 3 дБ (з 6 дБ для нормального падіння плоскої хвилі), що також менше чим закон масового поля.

Детальна конвективна теплопередача спостерігається на плоскій поверхні, де циліндр встановлений в надзвуковому потоці [62]. Під час випробування теплове зображення розподілу температури стінки приймається інфрачервоною камерою при постійному тепловому потоці на плоскій поверхні. З інформації вимірної температури стінки обчислюються коефіцієнти теплопередачі. Тіньовий графік і тести потоку масла проводяться для вивчення структури ударної хвилі і потоку поверхневого зсуву навколо виступаючого тіла, відповідно. Весь потік також моделюється чисельно. Число Маха по потоку, загальний тиск і число Рейнольдса становлять близько 3,600 кПа і $2,3 \times 10^6$ відповідно. Розглянутий ефект циліндра наближається потоку розглядається в діапазоні від 0° до 30° . З результатів видно, що в області взаємодії ударної хвилі / турбулентного прикордонного

шару спостерігається велике зростання теплообміну, а піковий нагрів проявляється особливо в області повторного приєднання потоку.

У техніці ідеально підібраного шару (ІПС) штучний шар вводиться при моделюванні поширення хвилі в якості граничного умови, що поглинає всі падаючі хвилі без будь-якого відображення [63]. Вважається, що такий шар неможливий через його складної формулювання матеріалу. У цій статті на основі трансформаційної еластодинаміки і комплексного перетворення координат пропонується новий метод проектування ІПС для пружних хвиль. Застосовуючи метод конформної трансформації, запропонований ІПС формулюється в термінах звичайних конститутивних параметрів, а потім може бути легко реалізований функціонально градуйованими в'язкопружними матеріалами.

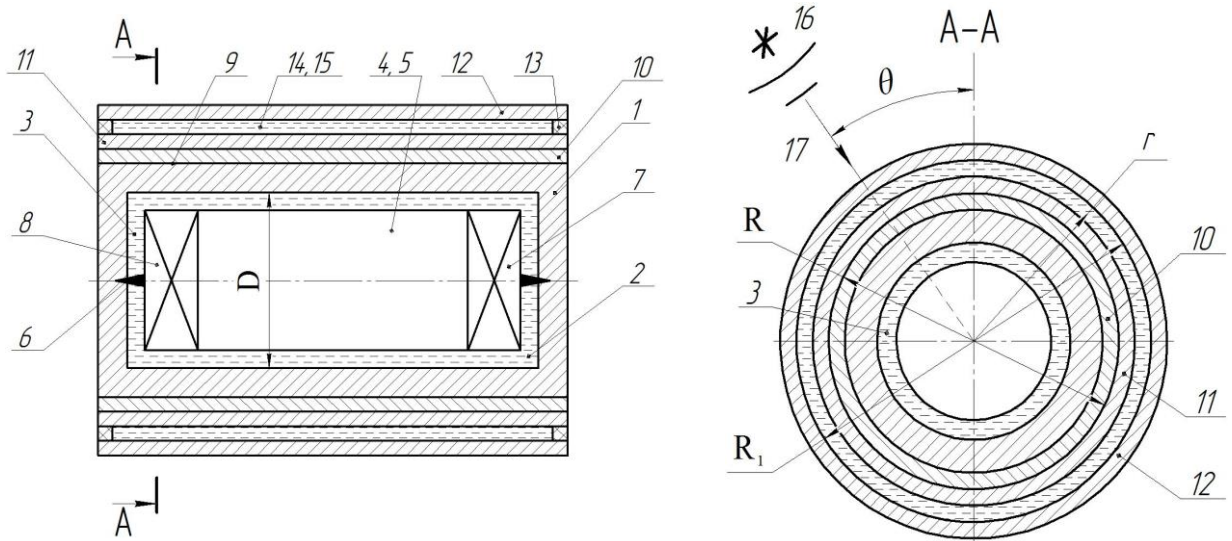
Представлені моделі для розрахунку втрат передачі звуку на шаруватих композитних циліндричних оболонках на основі тривимірних рівнянь анізотропної еластичності в роботі [64]. Ця модель включає двошарову багатошарову композитну циліндричну оболонку з нескінченної завдовжки, а також повітряний зазор, що падає на похилу плоску хвилю і занурений в рідину. Тому рівняння руху отримані для кожного моноклінного анізотропного шару обох стін двошарової шаруватої складовою циліндричної оболонки.

2.2.4. Обладнання та методи дослідження

В матеріалах рукопису роботи пропонується один із технічних варіантів захисту поплавкового гіроскопа від проникаючого ззовні акустичного випромінювання.

На лабораторній установці *MINI ULTRASONIC CLEANER MODEL 3560* виробництва КНР (рис. 2.6) проводиться практична оцінка ступеня ефективності пропонуємої конструкції, як буферної зони, від дії зовнішнього проникаючого акустичного випромінювання [Додаток В-1]. Ультразвукова установка “*модель 3560*” складається з: джерело живлення напругою $\sim 220\text{ В}$ (110 В) і частотою 50 Гц (60 Гц); подвійний вибір режиму вібрації

потужністю 30 Вт (50 Вт); робоча частота 42 кГц; час роботи 1 – 30 хв. (можливе регулювання); налагодження режимів роботи – кнопкове; спосіб



виведення інформації здійснюється відтворенням на безкристалічному дисплеї; випромінювач плоский, п'єзокерамічний; інтелектуальний привод MCU; установка використовується тільки за наявності води у ванні. Зовнішній вигляд випробувального стенду наведено на рис. 2.7.



Рис. 2.6. Зовнішній вигляд
ультразвукова установка
модель 3560

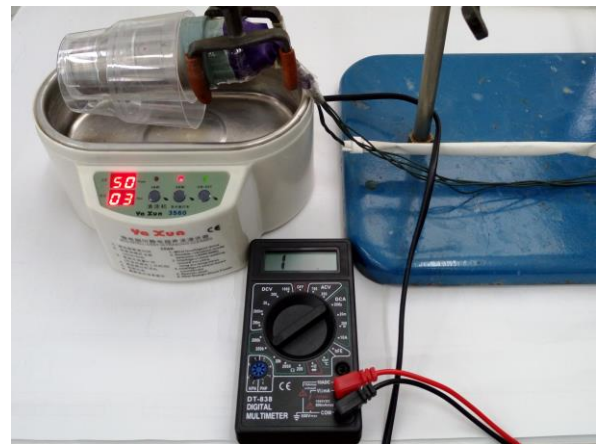


Рис. 2.7. Ультразвукова
установка, модель
випробувального стенду

2.2.5. *Напівнатурні дослідження промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2 убезпеченого буферною зоною*

Конструкція являє собою поплавковий гіроскоп, який містить циліндричний корпус з внутрішньою циліндричною, частково заповненою робочою рідиною, порожниною і розташованим в порожнині корпуса герметичним поплавковим підвісом з гіромотором та датчиками кута і моментів для визначення курсу, встановленим на опорах в торцях корпуса, на зовнішній частині корпуса розміщено тепловий кожух ззовні охоплений втулкою з двох співвісних, однакової довжини, колових оболонок і жорстко з'єднаних між собою на торцях плоскими кільцями, міжоболонковий простір герметичний і заповнений рідиною, внутрішній радіус втулки дорівнює радіусу теплового кожуха (рис. 2.8).

а)

б)

Рис. 2.8. Конструкція поплавкового гіроскопа: а) в поздовжньому перерізі;

б) переріз А-А: 1 - корпус поплавкового гіроскопа; 2 - внутрішня порожнина корпуса з діаметром D ; 3 - робоча рідина; 4 – гіровузол; 5 – гіромотор; 6 – опори; 7 - датчик кута; 8 - датчик моментів; 9 - зовнішня поверхня корпуса; 10 - тепловий кожух; 11 –оболонка радіусом R ; 12 – більша оболонка радіусом R_1 ; 13 – плоскі кільця; 14 – герметичний міжоболонковий простір; 15 – рідина в міжоболонковому просторі 14; 16 - звуковий випромінювач; 17 – ультразвуковий промінь

Більша оболонка ззовні обладнана звуковим випромінювачем з регулюємим, відносно її нормалі, напрямом променя, що створює в міжоболонковому, заповненого рідиною, просторі зону каустики у вигляді співвісної з зовнішньою оболонкою циліндричної поверхні радіуса r -

$$r = \frac{D_2}{2} \cos \alpha \quad [65],$$

з підвищеним енергетичним станом, яка проникаючому акустичному випромінюванню надзвичайно збільшить опір подальшому його

проходженню в середину приладу і створить вкрай високе розсіяння його енергії.

Штучне формування хвильового співпадання ультразвукового променя з коловою хвилею більшої оболонки досягається зміною кута падіння θ ультразвукового променя до значення кута співпадання θ_c , коли слід ультразвукової хвилі і колової хвилі в оболонці будуть співпадати [66].

При досягненні величини кута падіння θ ультразвукового променя, рівним куту співпадання θ_c , тобто формування резонансної ситуації, миттєво підвищується, турбулентний за структурою, енергетичний стан рідини. Таким чином, на шляху розповсюдження проникаючого акустичного випромінювання створюється «буферна зона», в якій здійснюється інтенсивне гасіння звукових хвиль проникаючого акустичного випромінювання, як показують напівнатурні випробування - до безпечно малого рівня.

Таке збільшення енергії початково-статичної рідини унеможливить подальше вільне проходження зовнішнього проникаючого випромінювання всередину приладу, і, таким чином, ліквідує додаткову похибку приладу від проникаючого акустичного вимірювання.

При дії на поплавковий гіроскоп променя 17 з частотою нижчою за граничну, в поверхні більшої оболонки 12 генеруються колові хвилі. Частота ω променя 17 регулюється звуковим випромінювачем 16 в межах, коли буде виконуватися нерівність

$$1 \ll \left(\frac{\omega}{c} R_1 \right),$$

де $\frac{\omega}{c}$ - хвильове число; c – швидкість звуку в рідині 15 міжоболонкового простору 14, що охоплює тепловий кожух 10; ω - частота ультразвукового випромінювача; R_1 - радіус зовнішньої більшої оболонки 12. Виконання цієї умови дозволяє елементарний відрізок більшої оболонки 12 сприймати за

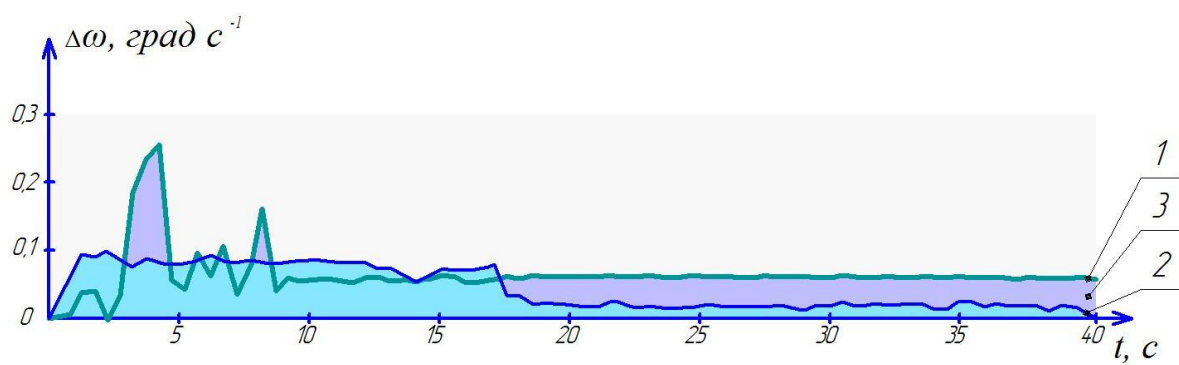
плоский фрагмент, який буде випромінювати в рідину 15 міжоболонкового простору 14 звукові хвилі під кутом [65]

$$\sin \alpha = \frac{c}{V},$$

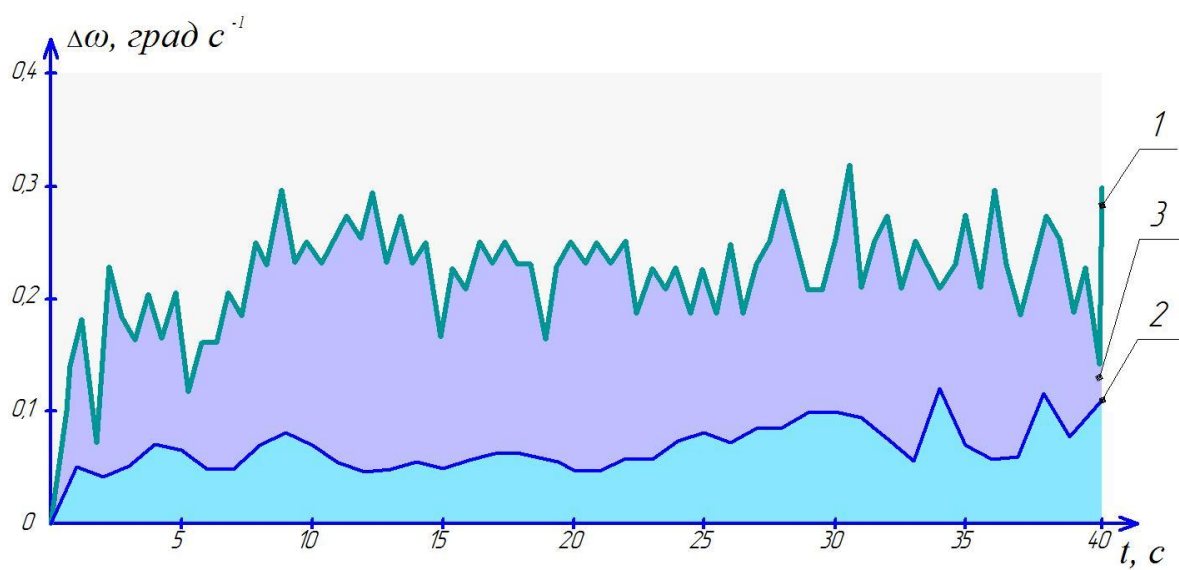
де V - швидкість колових хвиль в більшій оболонці 12, які, в свою чергу, по всьому об'єму, побудують поверхню каустики, співвісну з внутрішньою поверхнею зовнішньої більшої оболонки 12, тобто у вигляді колового циліндра [65] -

$$r = R_1 \cos \alpha,$$

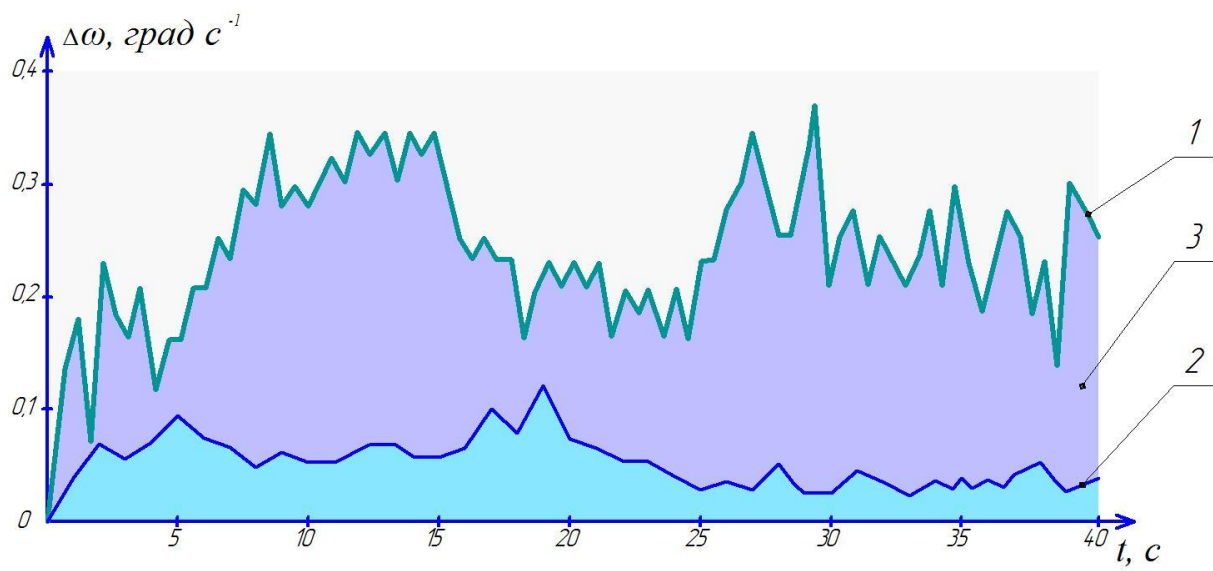
яка змінить початкий статичний стан рідини 15 міжоболонкового простору 14 на високоенергетичний, турбулентний, за структурою. Цей проміжок, в формі зони каустики, створить нездоланну перешкоду проходженню зовнішнього акустичного випромінювання в середину приладу, шляхом дисипації енергії зовнішніх звукових хвиль і буде, свого роду, *«буферною зоною»*. Змінюючи напрям променя 17, генеруємих звуковим випромінювачем 16 до величини θ_c (кута співпадання), можна сформувати резонансну ситуацію у вигляді хвильового співпадання, коли слід хвилі падаючого променя 17 і колової хвилі співпадають [66]. Це явище призведе, з одного боку, до прояву *«акустичної прозорості»* поверхні більшої оболонки 12, з іншого, значно збільшить енергію пройдешнього в середину ультразвукового променя і, таким чином, вся без останку енергія променя 17 піде на різке підвищення енергетичного стану рідини 15 у вигляді максимально можливого, що дозволить повністю розсіяти енергію падаючого зовнішнього випромінювання в зоні каустики (рис. 2.8). Випробування промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2 з вимкненим гідромотором в полі дії акустичного випромінювання в залежності від φ - кута відносно поздовжньої осі приладу [Додаток В-2 – Додаток В-9]



a)



б)



B)

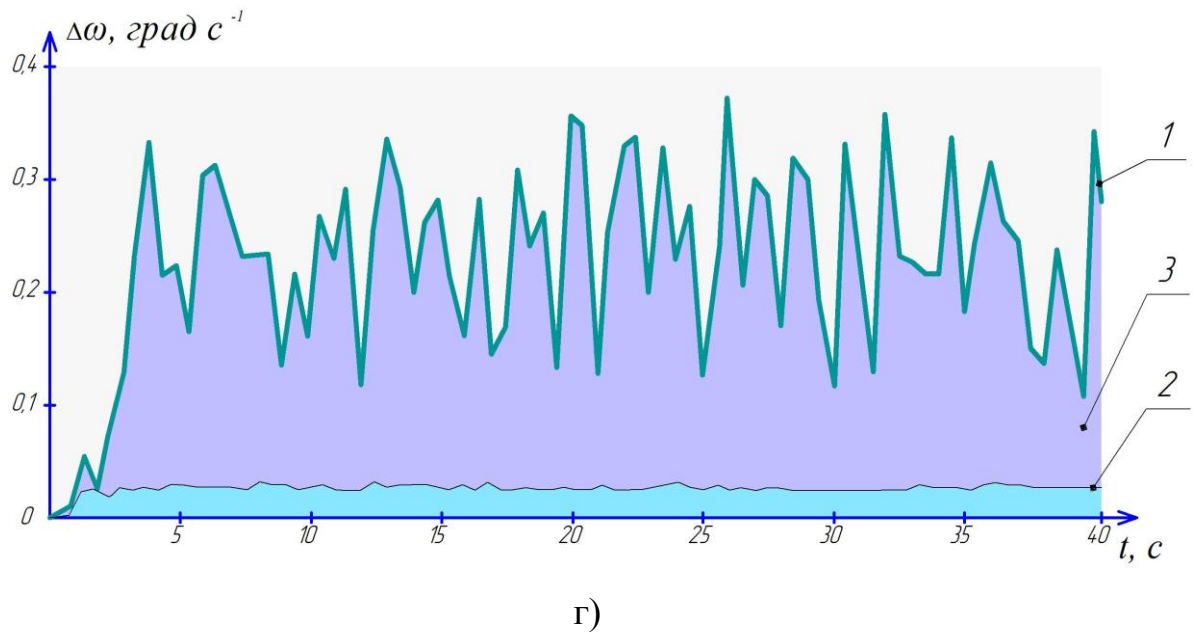


Рис. 2.9. ДУСУ під дією акустичного випромінювання при: а) $\varphi = 0^\circ$; б) $\varphi = 15^\circ$; в) $\varphi = 30^\circ$; г) $\varphi = 45^\circ$. 1 – без буферної зони, 2 – з буферною зоною, 3 – ступінь зниження похибки.

Таким чином, поверхня каустики, штучна формуєма в міжоболонковому просторі 14 виконує функції «буферної зони», і забезпечує практично абсолютно повну дисипацію енергії пройдешнього ззовні акустичного випромінювання, окрім того, підвищуючи ще ступінь турбулентності зони каустики рідини 15 міжоболонкового простору 14 [66].

2.2.6. Аналіз результатів досліджень

Дослідження на випробувальному стенді (рис. 2.7) довели, що найбільш уразливий кут відносно поздовжньої осі приладу, а саме $\varphi = 45^\circ$, при дії ультразвукового променя частотою 42 кГц за умови виключеного гіромотора поліагрегатний підвіс гіроскопа певним чином реагує на виникаючу вібрацію, і формує середній інтегральний зсув вихідного сигналу приладу $\beta_{zc} = 0,234 \text{ град} \cdot \text{с}^{-1}$, що відповідає середній похибці вимірювань $\Delta\omega_{cp} \approx 0,231 \text{ град} \cdot \text{с}^{-1}$.

Поліагрегатний підвіс гіроскопа, охоплений співвісними циліндричними оболонками, які розділені рідиною, певним чином реагує на виникаючу вібрацію, і формує середній інтегральний зсув вихідного сигналу приладу $\beta_{zc} = 0,025 \text{ град} \cdot \text{с}^{-1}$, що відповідає середній похибці вимірювань $\Delta\omega_{cp} \approx 0,02473 \text{ град} \text{ с}^{-1}$ (рис. 2.9).

Оригінальний бік запропонованої технічної реалізації для зменшення впливу проникаючого акустичного випромінювання полягає в тому, що, по суті справи, в зоні каустики рідинно-статичній частині підвісу гіроскопа штучно формується інша, зовнішня зона каустики у рідині втулки, а ультразвуковий опромінювач з регульовим напрямом променя надає можливість, у визначених межах, регулювати щільність цієї зони каустики, яка по суті справи, стає антиподом каустики поплавкового підвісу.

Пропонуєма технічна реалізація пристрою для гасіння впливу проникаючого акустичного випромінювання трохи ускладнює конструкцію приладу і потребує додаткову енергію для забезпечення роботи ультразвукового випромінювача.

Підвищення точності побудови триортогональної системи координат на рухомих об'єктах, в яких, окрім іншого, в якості сенсорів використовуються поплавкові гіроскопи, а також для стабілізації радарів та лідарів на рухомих об'єктах, які потребують максимально високої точності побудови координатних осей. Запропонована технічна реалізація приладів дозволить, без аби яких фінансових ускладнень, хоча і трохи ускладнить конструкцію, але досягти високої точності вимірювань. Остаточне вирішення цього питання залежить від того, що являється для даного апарата найбільш головним – висока точність системи координат і точність апаратури, яка знаходиться на стабілізованій платформі, чи мінімальні габарити.

Додаткові витрати, при створенні пропонуємого захисного блоку, пов'язані, перш за все, з компоновкою втулки на тепловому кожусі і забезпеченні системи регулювання штучного ультразвукового випромінювача відносно поверхні зовнішньої більшої оболонки.

Виходячи з результатів досліджень можна зробити наступні *висновки*:

Прогнозування результатів експерименту довели, що побудована експериментальна модель вивчаємого явища відповідає реаліям лабораторних дослідів, як у звичайному режимі, так і при наявності резонансної ситуації в підвісі – хвильового співпадання.

Експериментальні досліди пропонуємої технічної реалізації пристрою для формування буферної зони, за умови виконання великого хвильового розміру зовнішньої оболонки та наявності резонансної ситуації у вигляді хвильового співпадання при $\theta_c = 5^\circ$, зсув вихідного сигналу приладу становить $\beta_{zc} = 0,025 \text{ град} \cdot \text{с}^{-1}$ (рис. 2.9), що відповідає похибці вимірювань у $\Delta\omega_{cp} \approx 0,02473 \text{ град} \cdot \text{с}^{-1}$. Очевидно, що наявність буферної зони, штучно формуємою ультразвуковим випромінювачем, рішучим чином зменшує вплив проникаючого акустичного випромінювання в наслідок розсіяння енергії падаючої хвилі в зоні каустики (в буферній зоні).

Регулюєма ситуація прояву резонансу в підвісі гіроскопа, а саме геометричний резонанс, у вигляді хвильового співпадання, показує, що наближення до кута співпадання $\theta_c = 5^\circ$, коли слід хвилі випромінювача і слід колової хвилі зовнішньої оболонки співпадають. Рішучим чином збільшує енергетичний стан буферної зони, значно підвищує турбулентну структуру з наявними кавітаційними проявами і, відповідно, інтенсивно розсіює енергію падаючих хвиль до такого рівня, коли вони не в змозі чинити зсув нуля приладу (рис. 2.9).

Таким чином, практично доведена ефективність пропонуємої конструкції для штучного створення перешкоди зовнішньому акустичному випромінюванню.

Висновки до розділу 2

1. Пропонуємо технічне рішення, як показують лабораторні дослідження постає ефективним засобом боротьби із впливом проникаючого акустичного випромінювання на поплавковий гіроскоп і зменшує додаткову похибку вимірювань приблизно в 10 разів, і становить не більше $\Delta\omega_{cp} \approx 0,02473 \text{ град } c^{-1}$.

2. Побудована розрахункова схема явища дає можливість коректувати поверхню *ZONE KAUSTIKOS* відповідним підбором фізичних властивостей рідини, хвильового розміру і ступеня наближення до резонансної ситуації у вигляді хвильового співпадання сліду колової хвилі втулки і сліду падаючої хвилі. Теоретично встановлене значення кута співпадання $\theta_c = 3^\circ 41'$. Експериментально визначений кут співпадання сліду колової і сліду падаючої звукових хвиль $\theta_c = 5^\circ$, розбіжність теоретичних і практичних результатів досить припустима для проведених пошуків.

3. Незважаючи на припустимо невелике розходження результатів теоретичних і напівнатурних досліджень, головною тезою порівняльного аналізу слід вважати відповідність побудованої розрахункової моделі реаліям експлуатаційних умов приладу класу ДУСУ2.

РОЗДІЛ 3. ДИФРАКЦІЯ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ НА ПІДВІСІ ГІРОСКОПА. ПЛОСКА KAUSTICOS

Звуковий вплив на підвіс гіроскопа носить просторовий характер. Це накладає відбиток на структуру його впливу на гіроскоп в експлуатаційних умовах. Йдеться про виникнення особливостей локального і глобального типу, а також породження градієнта тепла в рідко-статичній частині підвісу з усіма витікаючими наслідками порушення паспортних характеристик. Проаналізуємо більш детально ці особливості.

3.1. Дифракція звукових хвиль на металевому кільці. Рушійні потоки в рідині та плинні потоки у внутрішньому просторі кільця.

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 призводять до виникнення акустичної вібрації широкого спектру частот в комплектуючих елементах підвісу гіроскопа, але найбільш небезпечним проявом постає формування умов виникнення і розвитку резонансних явищ в підвісі гіроскопа, а в поліагрегатній структурі зокрема. 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 пілотованих і безпілотових виробів.

3.1.1. Експериментальне визначення плоскої каустики в металевому кільці під дією проникаючого акустичного випромінювання

Досліджується взаємодія ультразвукового променя експлуатаційних умов використання гіперзвукових літальних апаратів з бортовою апаратурою управління і навігації, зокрема, з багатофазними структурами і наявними рідинностатичними елементами.

3.1.2. Виникнення зон активної і пасивної енергетики плоскої каустики

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.

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.

3.1.3. Аналіз стану досліджуваної проблеми

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 [67]. 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 [68, 69].

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 [70].

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 [20] при вивченні динаміки бортової апаратури РН «Енергія».

Перші результати були отримані, наприклад, для багатофазних механічних систем [71].

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 [72,73]. На літаках з турбогвинтовими двигунами створюється змінний тиск на панелі фюзеляжу, головним чином у зоні обертання гвинта [74].

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 [3,75]:

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

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 «восьми ступенів» Лайтхіла. 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) [76]. 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 [20]. 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 [77,78].

Прилади інерціальної навігації знайшли широке застосування у багатьох виробництвах, зокрема, в ракетно-космічній техніці [79,80]. Подібна затребуваність пояснюється чудовою властивістю інерціальних систем, властивою тільки їм, та автономністю [81].

Іноді з'являються критичні зауваження щодо можливостей інерціальних навігаційних систем для сучасних технологій [82].

3.1.4. Лабораторний стенд для вивчення явища дифракції звукових хвиль на кільці корпусу приладу

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.

Основою випробувального стенду являється погрузний 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.

3.1.5. Результати напівнатурних випробувань

За предмет досліджень обране мідне кільце, площа 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. 3.1). Поверхня рідини в посудині, відповідно, буде турбулізуватися (рис. 3.2).

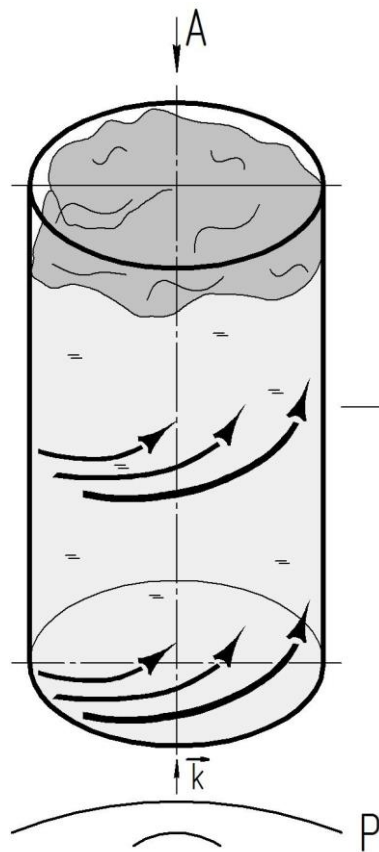


Рис. 3.1. Дія ультразвукового променя на рідину: P – акустичне випромінювання; $\vec{k}$ – хвильовий вектор.

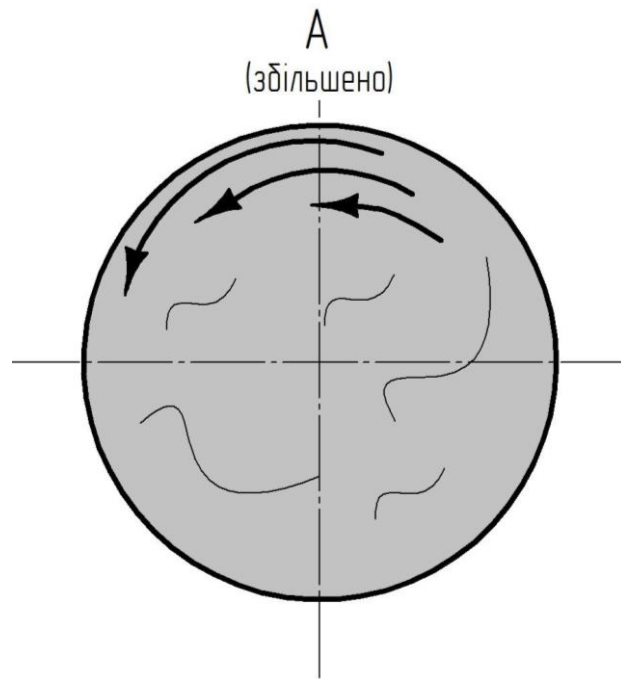


Рис. 3.2. Турбулентний стан поверхні рідини

Першопричиною формування рушійного потоку "1" буде слугувати циліндрична зона каустики (*zone kaustikos*), яка викликана аберацією звукових хвиль, діючих ззовні на посудину. Відбувається фокусування енергії акустичного випромінювання в циліндричній посудині з рідиною [Додаток Д-1].

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 $V_{n\partial}$ поздовжньої хвилі перевищує швидкість звука c_0 в рідині, тобто:

$$c_0 < V_{n\partial},$$

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

$$\sin \alpha = \frac{c_0}{V_{n\partial}}.$$

Аналогічно для згинних коливань оболонки, коли швидкість згинної хвилі $V_{зг}$ перевищує швидкість звуку в рідині $V_{зг} \geq c_0$. 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 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $28\text{ }^{\circ}\text{C}$, створюючи безградієнтний тепловий стан рідини по всьому об'єму (рис. 3.3).

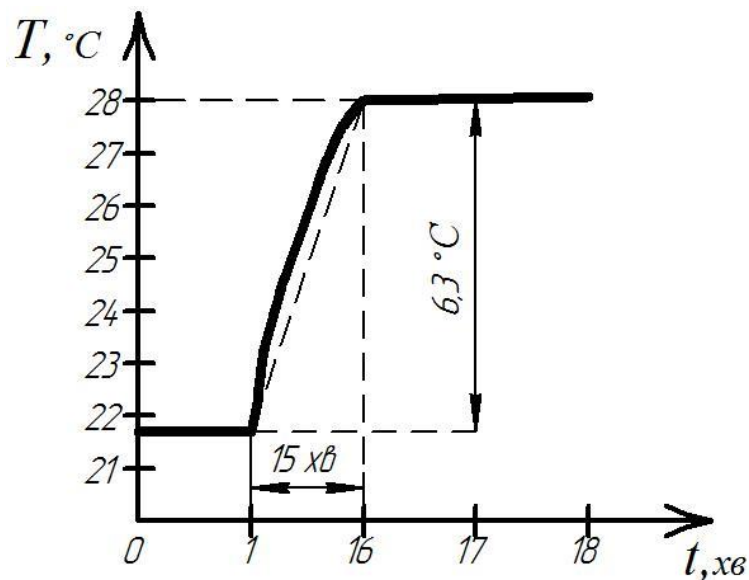


Рис. 3.3. Зміна температури рідини під дією ультразвукового променя

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 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ 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.

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. 3.4).

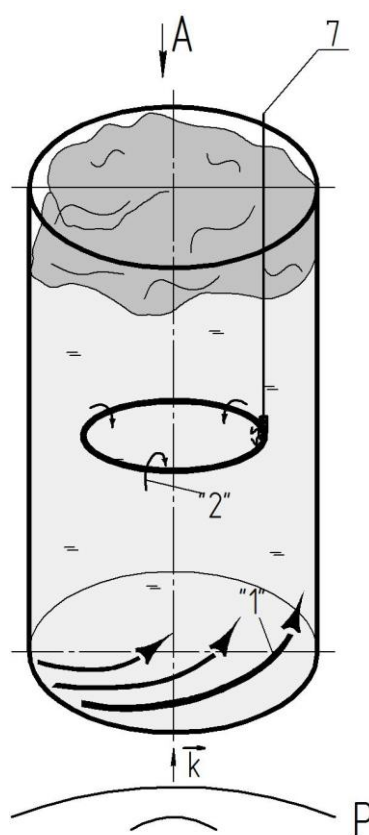


Рис. 3.4. Дія ультразвукового променя P на мідне кільце в посудині з рідиною: "1" – глобальний рушійний потік, "2" – локальний обмивний потік, 7 – тримач мідного кільця

Темні сектори відображають турбулентний стан рідини, світлі сектори – окреслюють статичний стан рідини (рис. 3.5).

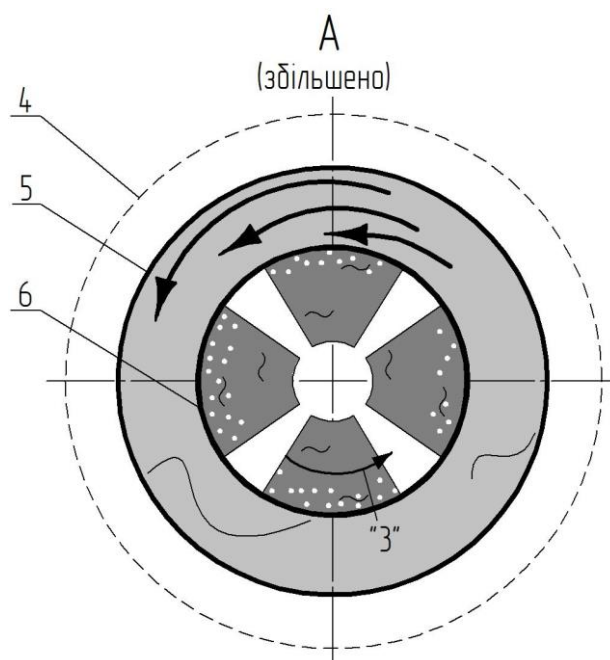


Рис. 3.5. Зони концентрації звукової енергії в площині кільця:

темні сектори – підвищена зона турбулентності; світлі сектори – зони звукової тіні: "3" – локальний обмивний потік, 4 – акустичний фронт, 5 – корпус посудини, 6 – мідне кільце.

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. 3.4).

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. 3.6, а).

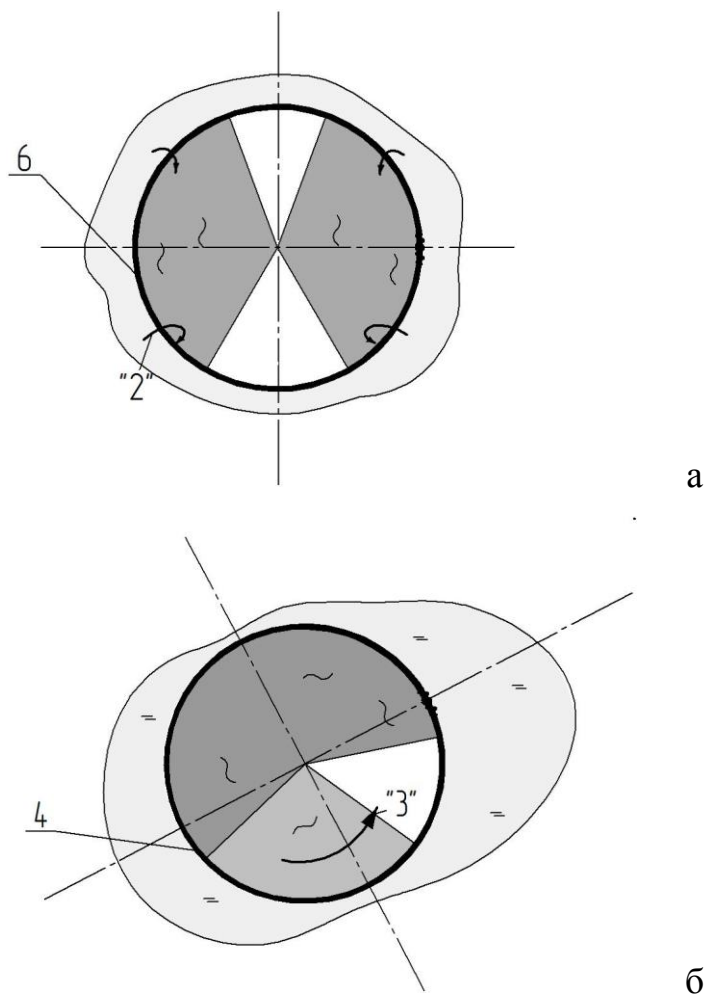


Рис. 3.6. Зони концентрації звукової енергії: а – мідне кільце займає вертикальне положення, де "2" – локальний обмивний потік, 6 – мідне кільце; б – площина кільця становить кут 45° з віссю посудини, де "3" – локальний обмивний потік, 4 – мідне кільце.

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. 3.6, б).

3.1.6. Аналіз результатів досліджень

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.

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.

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

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 радіотранслюючі 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 і 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.

Основні висновки в цілому:

1. Проведені напівнатурні дослідження стану зануреного в рідину мідного кільця доводять багатогранність впливу звукового променя на стан усієї системи. Експериментально доведено формування глобального рушійного потоку під дією звукового променя 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.

3.2. Двошаровий підвіс поплавкового гіроскопа

Запропонована конструкція належить до галузі точного машинобудування, а саме до поплавкових гіроскопів, і може бути використана в складі пілотажно-навігаційного обладнання надводних, підводних апаратів, а також надзвукової авіаційної техніки, які при льотній експлуатації підвладні дії інтенсивного акустичного випромінювання.

В основі розробки лежить існуюча конструкція поплавкового гіроскопа, що містить сферичний корпус із сферичною, частково заповненою важкою рідиною, порожниною і розміщений в корпусі гіровузол з опорами і датчиками кута і моментів [83].

Компенсація швидкості теплового дрейфу гіроскопа здійснюється за рахунок рівності конвективного моменту від Архімедових сил, які викликають на роторах датчиків кута і датчиків моментів, завдяки установці роторів датчика кута і датчика моментів на гіровузлі сферичної форми за допомогою кронштейнів заданої довжини.

Умова забезпечення рівності маси гіровузла і виштовхуючої сили не реалізується, а розвантаження опор карданового підвісу виконується тільки шляхом вибору параметрів рідини.

Основними недоліками цього технічного рішення є складність виготовлення та балансування підвісу внаслідок наявності в його конструкції деталей з поверхнями сферичної форми, а також у відсутності ефективних технічних рішень по зменшенню дії проникаючого акустичного випромінювання.

Розглянуто конструкцію поплавкового гіроскопа в основі якого міститься циліндричний корпус з внутрішньою циліндричною, частково заповненою важкою рідиною, порожниною і розміщений в порожнині корпуса герметичний гіровузол з опорами і датчиками кута і моментів для визначення кутової швидкості літальних апаратів, встановленим на опорах в торцях корпуса, на зовнішній частині корпуса розміщено тепловий кожух [84,85].

Внутрішня порожнина поплавка зазвичай заповнена гелієм. Поплавок спирається на каменеві підшипники і знаходиться у зваженому стані у важкій рідині. Товщина слою рідини між корпусом гіроскопа і поплавком становить приблизно $0,2$ см у радіальному напрямку. Велика густина важкої рідини і мала величина робочого зазору дозволяють отримати необхідний коефіцієнт демпфірування.

Недоліком даної конструкції можна виділити недостатньо дійовий захист гіровузла від збурення проникаючим інтенсивним акустичним випромінюванням надзвукових літальних апаратів.

Цей поплавковий гіроскоп є найбільш близьким до запропонованого за технічною суттю та ефектом, що досягається і може бути визнаним за найближчий аналог пропонованої конструкції.

В основу заявленої конструкції поставлена задача зменшення додаткових похибок поплавкового гіроскопа в експлуатаційних умовах надзвукового польоту внаслідок дії проникаючого інтенсивного акустичного випромінювання, яке генерує в поверхні герметичного гіровузла велику кількість коливань, в тому числі і резонансних, формуюючи її пружно-напружений стан, який помилково сприймається гіроскопом за корисний сигнал.

Запропонований поплавковий гіроскоп з двошаровим герметичним гіровузлом містить циліндричний корпус з внутрішньою циліндричною, частково заповненою важкою рідиною, порожниною і розміщений в порожнині корпуса герметичний гіровузол з опорами і датчиками кута і моментів для визначення кутової швидкості літальних апаратів, встановленим на опорах в торцях корпуса, на зовнішній частині корпуса розміщено тепловий кожух, згідно заявленого винаходу новим є те, що ззовні поверхня герметичного гіровузла співвісно і з радіальним зазором охоплена циліндричною оболонкою, виконаної з матеріалу з високим коефіцієнтом внутрішнього поглинання, тієї ж довжини, що і герметичний гіровузол, торці якої плоскими кільцями з отворами з'єднані з торцями герметичного гіровузла.

Технічний результат від використання запропонованої конструкції поплавкового гіроскопа з двошаровим герметичним гіровузлом забезпечується шляхом обладнання зовнішньої поверхні герметичного гіровузла співвісно і з радіальним зазором охоплюючою його циліндричною оболонкою, виконаною з матеріалу з високим коефіцієнтом внутрішнього

поглинання, тієї ж довжини, що і герметичний гіровузол, торці якої плоскими кільцями з отворами з'єднані з торцями герметичного гіровузла, що за інших, рівних з найближчим аналогом умов, підвищує рівень захисту поплавкового гіроскопа з двошаровим герметичним гіровузлом від збурення проникаючим інтенсивним акустичним випромінюванням надзвукових літальних апаратів.

Проаналізуємо дію проникаючого інтенсивного акустичного випромінювання надзвукового польоту на поплавок гіроскоп з двошаровим герметичним гіровузлом.

Проникаюче в середину крізь корпус поплавкового гіроскопа акустичне випромінювання потрапляє в перший шар важкої рідини, між поверхнею порожнини корпусу і зовнішньою поверхнею оболонки, виконаної з матеріалу з високим коефіцієнтом внутрішнього поглинання, де втрачає значну частину своєї звукової енергії, а інша частина породжує в матеріалі оболонки стохастичні за структурою безліч форм коливань, в тому числі, і резонансних, надалі акустичне збурення надходить до другого шару важкої рідини, між внутрішньою поверхнею оболонки і поверхнею герметичного гіровузла. Внаслідок того, що оболонка з'єднана на торцях плоскими кільцями з отворами з герметичним гіровузлом, а вони, як відомо, мають достатньо високу жорсткість в своїй площині, буде практично відсутня ретрансляція енергії коливальних процесів з бічної поверхні оболонки через торцеві кільця, і, буде здійснюватися лише внутрішньою поверхнею охоплюючої оболонки. Значно ослаблене, зовнішнє збурення, надійде в другий шар важкої рідини, між внутрішньою поверхнею охоплюючої оболонки і поверхнею герметичного гіровузла, але вже не зможе суттєво вплинути на вихідний стаціонарний стан другого шару важкої рідини. Отже, оболонка буде виконувати функцію пасивного звукоізолюючого елемента [65].

Таким чином, наявність двох шарів важкої рідини і, відповідно, збільшення поверхні контакту підвісу з важкою рідиною, а саме, між

поверхнею внутрішньої порожнини корпусу і поверхнею оболонки, а також між внутрішньою поверхнею оболонки і поверхнею герметичного гіровузла, що надає додаткову можливість для вибору бажаного коефіцієнту демпфірування підвісу, а також для забезпечення ефективної вібростійкості підвісу.

Запропоноване технічне рішення дозволить підвищити рівень захисту двошарового герметичного гіровузла від збурення проникаючим інтенсивним акустичним випромінюванням надзвукових літальних апаратів.

Сукупність наведених ознак конструкції поплавкового гіроскопа з двошаровим герметичним гіровузлом забезпечує досягнення нового технічного результату.

Сутність пропонованої конструкції пояснюється відповідним описом та кресленнями, де: на рис. 3.7 схематично зображений заявляємий поплавок гіроскоп з двошаровим герметичним гіровузлом в поздовжньому перерізі, збільшено; на рис. 3.8 зображений вид А з рис. 3.7, збільшено.

Запропонований поплавок гіроскоп з двошаровим герметичним гіровузлом (рис. 3.7) використовується в складі пілотажно-навігаційного обладнання надводних, підводних апаратів, а також надзвукової авіаційної техніки, які при льотній експлуатації підвладні дії інтенсивного акустичного випромінювання, і містить циліндричний корпус 1 з внутрішньою циліндричною, діаметром D , порожниною 2, частково заповненою важкою рідиною 3. В порожнині 2 корпусу 1 розташований герметичний гіровузол 4, який встановлюється на опорах 5 в торцях корпусу 1 і має датчик кута 6 і датчик моментів 7 для визначення кутової швидкості літального апарату, на зовнішній частині корпусу 1 розміщено тепловий кожух 8 діаметра D_1 . Зовнішня поверхня герметичного гіровузла 4 співвісно і з радіальним зазором охоплена циліндричною оболонкою 9, виконаною з матеріалу з високим коефіцієнтом внутрішнього поглинання, тієї ж довжини, що і герметичний гіровузол 4, торці якої плоскими кільцями 10 з отворами 11 з'єднані з торцями герметичного гіровузла 4.

Робота поплавкового гіроскопа з двошаровим герметичним гіровузлом здійснюється наступним чином.

При дії на поплавковий гіроскоп зовнішнього проникаючого акустичного випромінювання 12, частина його відбивається від поверхні теплового кожуха 8, а інша частина проходить крізь тепловий кожух 8 і попадає на зовнішню поверхню корпусу 1. Надалі, проникаюче акустичне випромінювання 12 через корпус 1 надходить в перший шар 13 важкої рідини 3, між поверхнею порожнини 2 корпусу 1 і зовнішньою поверхнею 14 циліндричної оболонки 9, виконаною з матеріалу з високим коефіцієнтом внутрішнього поглинання, де втрачає значну частину своєї звукової енергії, а інша частина породжує в матеріалі циліндричної оболонки 9 стохастичні за структурою безліч форм коливань, в тому числі і резонансних. Надалі, акустичне збурення прямує до другого шару 15 важкої рідини 3, між внутрішньою поверхнею 16 циліндричної оболонки 9 і поверхнею 17 герметичного гіровузла 4. Внаслідок того, що циліндрична оболонка 9 з'єднана на торцях плоскими кільцями 10 (рис 3.8) з отворами 11 з герметичним гіровузлом 4, а вони, як відомо, мають достатньо високу жорсткість в своїй площині, буде практично відсутня трансляція енергії коливальних процесів циліндричної оболонки 9 через торці плоских кілець 10 до герметичного гіровузла 4, і, збурення буде передаватися поверхні 17 герметичного гіровузла 4 тільки внутрішньою поверхнею 16 циліндричної оболонки 9 з високим коефіцієнтом внутрішнього поглинання. Значно ослаблене, зовнішнє збурення, надійде в другий шар 15 важкої рідини 3, між внутрішньою поверхнею 16 охоплюючої циліндричної оболонки 9 і поверхнею 17 герметичного гіровузла 4, але вже не зможе суттєво вплинути на вихідний стаціонарний стан другого шару 15 важкої рідини 3, внаслідок вирішальної втрати енергії під час надходження на всьому шляху до герметичного гіровузла 4. Отже, циліндрична оболонка 9 буде виконувати функцію пасивного звукоізолюючого елемента [65].

Таким чином, наявність двох шарів 13 і 15 важкої рідини 3, а саме, між поверхнею внутрішньої порожнини 2 корпусу 1 і зовнішньою поверхнею 14 циліндричної оболонки 9, а також між внутрішньою поверхнею 16 циліндричної оболонки 9 і поверхнею герметичного гіровузла 4, поетапно знизить рівень проникаючого акустичного збурення до небезпечного, в порівнянні з найближчим аналогом, де має місце лише один шар важкої рідини. Внаслідок цього здійснюється інтенсивна турбулізація важкої рідини 3 з наступним впливом її на поверхню герметичного гіровузла 4, породжуючи додаткові похибки вимірювань кутової швидкості літального апарату.

Двошарова модель поплавкового гіроскопа, окрім зазначеного, надає додаткову можливість для створення бажаного коефіцієнту демпфірування підвісу, а також забезпечує ефективну віброізоляцію підвісу не тільки під час транспортування льотних виробів з ангару на відкриті стартові позиції, але, також, і в експлуатаційних умовах цільового призначення апарату.

Отже, використання запропонованого поплавкового гіроскопа з двошаровим герметичним гіровузлом дозволить, за допомогою нових властивостей, дієво підвищити захист герметичного гіровузла від збурення зовнішнім проникаючим інтенсивним акустичним випромінюванням надзвукових літальних апаратів.

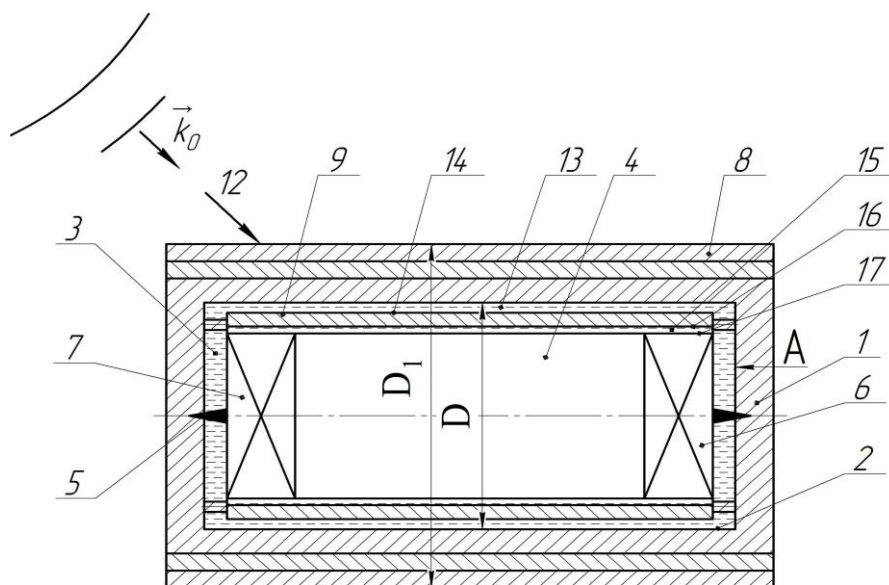


Рис. 3.7. Поплавковий гіроскоп з двошаровим герметичним гіровузлом

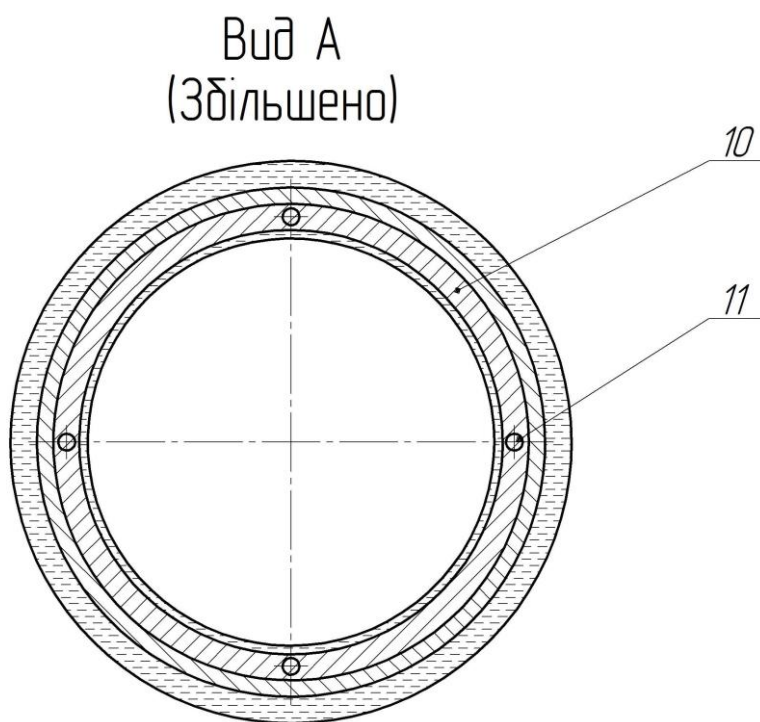


Рис. 3.8. Збільшений вигляд А поплавкового гіроскопа

3.3. Поплавковий гіроскоп убезпечений від виникнення зон каустики

Запропонована конструкція поплавкового гіроскопа може бути використана в складі пілотажно-навігаційного обладнання надводних, підводних апаратів, а також авіаційної техніки суборбітального і атмосферного призначення, які при льотній експлуатації підвладні дії проникаючого акустичного випромінювання.

Розглянуто поплавковий гіроскоп, який містить сферичний корпус із сферичною, частково заповненою важкою рідиною, порожниною і розміщений в корпусі гіровузол з опорами і датчиками кута і моментів [83].

Компенсація швидкості теплового дрейфу розглядаємого гіроскопа здійснюється за рахунок рівності конвективного моменту від Архімедових сил, які викликають на роторах датчиків кута і датчиків моментів, завдяки установці роторів датчика кута і датчика моментів на гіровузлі сферичної форми за допомогою кронштейнів заданої довжини. Умова забезпечення рівності маси гіровузла і виштовхуючої сили не реалізується, а

розвантаження опор карданового підвісу виконується тільки шляхом вибору параметрів рідини.

Недолік цього технічного рішення полягає в складності виготовлення та балансування підвісу внаслідок наявності в його конструкції деталей з поверхнями сферичної форми, а також у відсутності ефективних технічних рішень по зменшенню дії проникаючого акустичного випромінювання.

В основі ж запропонованої конструкції лежить поплавковий гіроскоп, який містить розміщений в тепловому кожуху циліндричний корпус з внутрішньою циліндричною, частково заповненою важкою рідиною, порожниною і розміщений в порожнині корпусу герметичний гіровузол з опорами і датчиками кута і моментів для визначення кутової швидкості літальних апаратів [84,85].

Внутрішня порожнина поплавка зазвичай заповнена гелієм. Поплавок спирається на каменеві підшипники і знаходиться у зваженому стані у важкій рідині. Товщина слою рідини між корпусом гіроскопа і поплавком становить приблизно $0,2$ см у радіальному напрямку. Велика густина важкої рідини і мала величина робочого зазору дозволяють отримати необхідний коефіцієнт демпфірування.

Недоліком обраного технічного рішення є недостатньо дійовий захист гіровузла від збурення проникаючим зовнішнім акустичним випромінюванням і ударною N-хвилею гіперзвукових літальних апаратів.

В основу запропонованої конструкції поставлена задача зменшення додаткових похибок поплавкового гіроскопа в експлуатаційних умовах гіперзвукового польоту внаслідок дії проникаючого акустичного випромінювання, яке породжує зони каустики з підвищеним енергетичним станом рідинно-статичної складової підвісу гіроскопа, шляхом ліквідації виникаючих в натурних умовах зон каустики внаслідок дії згинних коливань корпусу на частотах вище граничної і колових хвиль на частотах нижче граничної.

Пропонований поплавковий гіроскоп убезпечений від зон каустики містить циліндричний корпус з внутрішньою циліндричною, частково заповненою важкою рідиною, порожниною і розміщений в порожнині корпуса герметичний гіровузол з опорами і датчиками кута і моментів для визначення кутової швидкості літальних апаратів, встановленим на опорах в торцях корпуса, на зовнішній частині корпуса розміщено тепловий кожух, згідно заявленого винаходу новим є те, що поверхня внутрішньої циліндричної, частково заповненої важкою рідиною, порожнини корпуса має рівномірно нанесені з однаковим інтервалом поздовжні і поперечні трикутної форми канавки.

Технічний результат від використання запропонованого поплавкового гіроскопа убезпеченого від зон каустики забезпечується шляхом рівномірного нанесення з однаковим інтервалом поздовжніх і поперечних трикутної форми канавок на поверхні внутрішньої циліндричної, частково заповненої важкою рідиною, порожнини корпуса, що за інших, рівних з найближчим аналогом умов, підвищує рівень захисту герметичного гіровузла від збурення проникаючим зовнішнім акустичним випромінюванням і ударною N-хвилею гіперзвукових літальних апаратів.

Проаналізуємо спочатку механізм дії *колової* хвилі, генеруємої в корпусі поплавкового гіроскопа убезпеченого від зон каустики проникаючого акустичного випромінювання. Вважаючи бічну частину корпусу оболонкою достатньо великого хвильового розміру kR , тобто такою, коли виявляється властивість $kR \gg 1$ ($k = \frac{\omega}{c}$, k – хвильове число, ω – частота проникаючого акустичного випромінювання, c – швидкість звуку у повітрі; R – радіус внутрішньої порожнини корпуса), доречно розглядати окремо взятий фрагмент кільця корпуса як пластину з приблизно нульовою кривизною, швидкість *поздовжніх* хвиль в якій співпадає з *коловою* швидкістю вздовж паралелі корпуса, тобто V_{np} .

Швидкість *поздовжньої* хвилі в металевому корпусі V_{np} набагато більша швидкості звуку c_0 в рідинно-статичній частині поплавкового підвісу, тобто у важкій рідині, таким чином

$$V_{np} \gg c_0,$$

внаслідок цього колова хвиля корпусу, яка біжить уздовж периферії шпангоута, буде випромінювати під кутом α у важку рідину звукову хвилю, причому напрямок її складе з вектором швидкості V_{np} кут α [65], який визначається виразом:

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

Внаслідок цього, значна частка енергії звукової хвилі буде зосереджуватися поблизу кола радіуса r_1 , утворюючи циліндричну поверхню, співвісну з циліндричною поверхнею внутрішньої порожнини корпусу поплавкового гіроскопа, так звану зону каустики [65], тобто зону підвищеної енергетичної активності рідини, внаслідок чого радикально зміниться вихідний статичний стан важкої рідини у бік турбулентної високочастотної, стохастичної за структурою динаміки

$$r_1 = R \cos \alpha.$$

Наприклад, якщо взяти для конкретності радіус R внутрішньої порожнини корпусу рівним $R = 2,5 \text{ см}$, матеріал корпусу вважати алюмінієм, для якого ($V_{np} = 6400 - 5200 \text{ м/с}$, $V_m = 3080 \text{ м/с}$), рідинно-статичний підвіс – гліцерином, для якого ($c_0 = 1923 \text{ м/с}$ при $t = 20^\circ\text{C}$), а частоту зовнішнього випромінювання прийняти у $f = 42 \text{ кГц}$, тоді, хвильовий розмір внутрішньої поверхні корпусу $kR = \frac{\omega}{c_0} R = \frac{2\pi f}{c_0} R \approx 3,43$, тобто достатньо більше 1. Отже можна вважати –

$$\sin \alpha = \frac{c_0}{V_{np}} \approx 0,37;$$

$$\alpha = 21^\circ 40'.$$

Звідки радіус циліндричної каустики r_1 буде дорівнювати:

$$r_1 = R \cos \alpha \approx 2,32 \text{ (см)},$$

тобто знаходиться на відстані $0,18 \text{ см}$ від поверхні внутрішньої порожнини корпусу. Слід нагадати, що відстань від поверхні внутрішньої порожнини до герметичного гіровузла в радіальному напрямку становить $0,2 \text{ см}$.

З тієї ж причини, *поперечна* хвиля, згинна хвиля генеруєма акустичним випромінюванням в корпусі в радіальному напрямку, буде, за умови відсутності герметичного гіровузла, приводить до концентрації енергії поблизу циліндричної поверхні радіуса r_2 :

$$\sin \beta = \frac{c_0}{V_{nn}} \approx 0,67;$$

$$\beta = 42^\circ;$$

$$r_2 = R \sin \beta = 1,68 \text{ (см)}.$$

Присутність герметичного гіровузла стане на заваді утворенню циліндричної каустики радіуса r_2 , внаслідок чого поверхня герметичного гіровузла буде підвладна інтенсивній дії звукового випромінювання згинних хвиль, що сформує пружно-напружений стан поверхні герметичного гіровузла з великою кількістю генеруємих хвиль, в тому числі і резонансних. Це явище буде сприйматися гіроскопом як вхідна величина, і сформує додаткову похибку вимірювань кутової швидкості літального апарату.

Так як радіус герметичного гіровузла становить 2 см , тоді, очевидно, що каустична поверхня радіуса r_2 зникне, а каустична поверхня радіуса r_1 – залишиться.

Каустичні поверхні радіуса r_1 чітко розмежують області акустичної тіні в рідинно-статичній частині підвісу – в бік корпусу і в бік середини порожнини.

Наявність поздовжніх і поперечних канавок на поверхні внутрішньої порожнини корпусу частково заповненої важкою рідиною, змінює ідеально гладку циліндричну поверхню на сукупність рівномірно розташованих

чотиригранних зрізаних пірамідок, які стануть на заваді безперешкодному інтенсивному випромінюванню поверхнею внутрішньої порожнини корпусу хвиль в рідинну частину підвісу, а потому і знищить саму можливість утворення зони каустики радіуса r_1 у рідину коловими хвилями і силового впливу на поверхню герметичного гіровузла звукових хвиль, породжених згинними коливаннями корпусу поплавкового гіроскопа.

Запропоноване технічне рішення дозволить підвищити рівень захисту герметичного гіровузла від збурення проникаючим зовнішнім акустичним випромінюванням і ударною N-хвилею гіперзвукових літальних апаратів.

За необхідності, можна підвищити ефективність убезпечення поплавкового гіроскопа від появи зон каустики радіуса r_1 , шляхом установки на поверхні зрізу чотиригранних пірамідок тонкого шару матерії [66].

Сукупність наведених ознак пропонованого поплавкового гіроскопа убезпеченого від зон каустики забезпечує досягнення нового технічного результату.

Сутність нової конструкції пояснюється відповідним описом та кресленнями, де:

на рис. 3.9 схематично зображений заявляємий поплавковий гіроскоп убезпечений від зон каустики в поздовжньому перерізі;

на рис. 3.10 зображений переріз А-А на рис. 3.9, фрагмент поверхні внутрішньої циліндричної, частково заповненої важкою рідиною, порожнини корпусу поплавкового гіроскопа убезпеченого від зон каустики;

на рис. 3.11 зображені чотиригранні зрізані пірамідки на поверхні внутрішньої порожнини корпусу поплавкового гіроскопа убезпеченого від зон каустики.

Запропонований поплавковий гіроскоп убезпечений від зон каустики (рис 3.9) використовується в складі пілотажно-навігаційного обладнання надводних, підводних апаратів, а також авіаційної техніки суборбітального і атмосферного призначення, які при льотній експлуатації підвладні дії проникаючого акустичного випромінювання і містить циліндричний корпус

1 з циліндричною, діаметром D , порожниною 2, яка частково заповнена важкою рідиною 3. В порожнині 2 корпусу 1, розташований герметичний гіровузол 4, який встановлюється на опорах 5 в торцях корпусу 1 і має датчик кута 6 і датчик моментів 7 для визначення кутової швидкості літального апарату, на зовнішній частині корпусу 1 розміщено тепловий кожух 8 діаметра D_1 . На внутрішній поверхні 9 корпусу 1 рівномірно нанесені з однаковим інтервалом поздовжні 10 і поперечні 11 трикутної форми канавки. Поздовжні 10 і поперечні 11 трикутної форми канавки (рис 3.10) утворюють чотиригранні зрізані пірамідки 12 (рис 3.11) на поверхні внутрішньої порожнини корпусу поплавкового гіроскопа забезпеченого від зон каустики.

Робота заявленого поплавкового гіроскопа забезпеченого від зон каустики здійснюється наступним чином.

При дії на поплавок гіроскоп зовнішнього проникаючого акустичного випромінювання 13, частина його відбивається від поверхні теплового кожуха 8, а інша частина проходить крізь тепловий кожух 8, попадає на зовнішню поверхню корпусу 1 і генерує в ньому колові хвилі швидкості V . Внаслідок того, що швидкість звуку c_0 у важкій рідині 3 набагато менша за швидкості V в корпусі 1, плоскі фрагменти поверхні внутрішньої порожнини 2 будуть випромінювати у важку рідину 3 звукові хвилі під кутом α , які будуть утворювати зону каустики радіуса r_1 , навпаки, чотиригранні зрізані пірамідки 12 цілком виключають саму можливість випромінювання 13 звукових хвиль і утворення за їх допомогою зони каустики. Зони каустики збурюють і порушують вихідний статичний стан важкої рідини 3 і формують її підвищену енергетичну, турбулентною за структурою, динаміку, що призводить до виникнення додаткової активної дії важкої рідини 3 на поверхню герметичного гіровузла 4, породжуючи в ньому безліч форм коливань по всій поверхні і створюючи пружно-наружений стан поверхні герметичного гіровузла 4, що в своїй сукупності помилково сприймається гіроскопом за вхідну величину і викликає додаткові похибки вимірювань кутової швидкості літального апарату. Рівномірне нанесення з

однаковим інтервалом поздовжніх 10 і поперечних 11 трикутної форми канавок буде на внутрішній циліндричній, частково заповненій важкою рідиною 3, поверхні 9 порожнини 2 корпуса 1 (рис. 3.9, рис. 3.10, рис. 3.11), рівномірно розташовані по поверхні чотиригранні зрізані пірамідки 12, ліквідувавши, цим самим, лінійні фрагменти, які мають добру властивість для випромінювання, замінивши пластинчасті фрагменти порожнини 2 корпуса 1 на рівномірно розташовані пірамідки 12 із перемінною жорсткістю поверхнею порожнини у всіх трьох напрямках і принципово меншою здатністю на зовнішнє акустичне випромінювання 13 і збурення важкої рідини 3 ніж плоскі фрагменти.

Таким чином, ліквідація плоских фрагментів на внутрішній поверхні 9 порожнини 2 корпуса 1 усуває саму причину появи у важкій рідині 3, спрямованих у важку рідину 3, звукових хвиль і подальше їх об'єднання у зони каустики у вигляді циліндричних, соосних з циліндричною поверхнею порожнини 2 корпуса 1, поверхні енергетичної активності рідинної складової підвісу – важкої рідини 3.

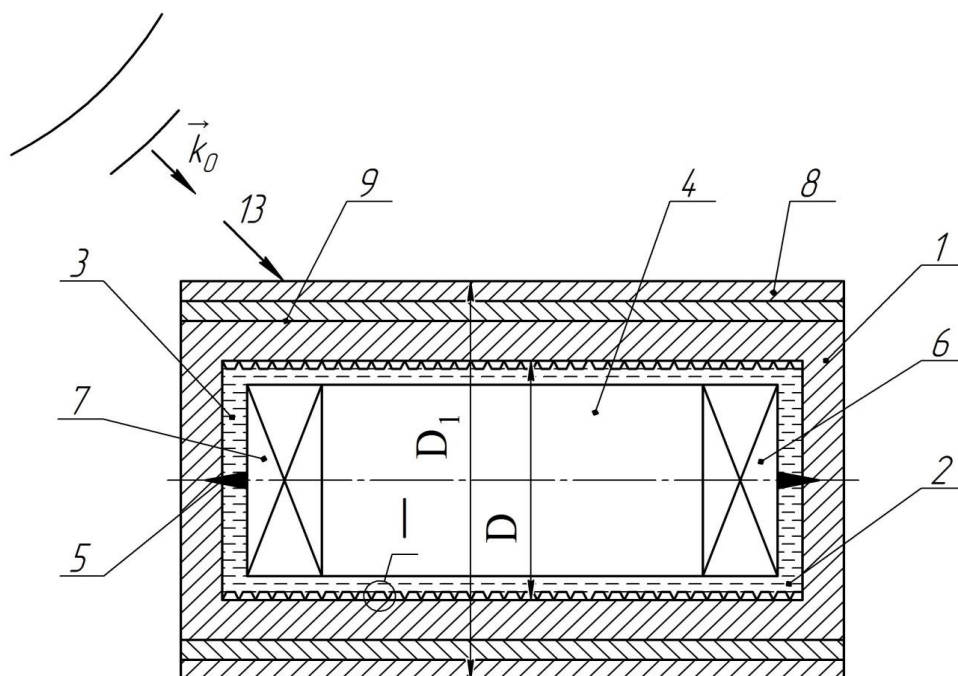


Рис. 3.9. Поплавковий гіроскоп убезпечений від зон каустики в поздовжньому перерізі

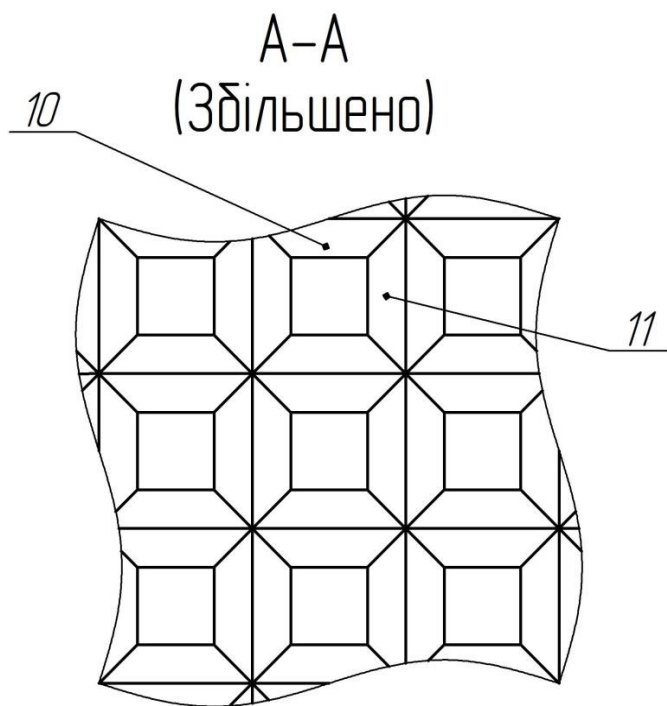


Рис. 3.10. Фрагмент поверхні
зрізані

внутрішньої циліндричної
порожнини

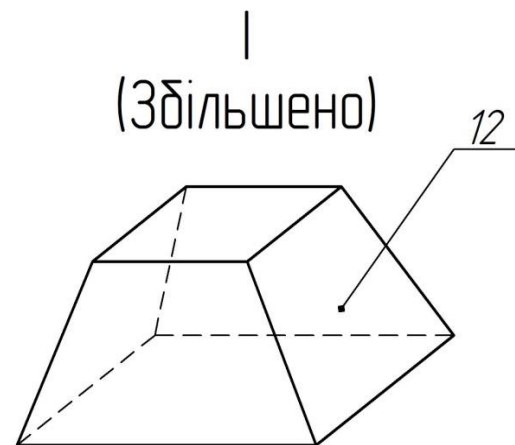


Рис. 3.11. Чотиригранні

пірамідки на внутрішній
порожнині корпусу

Отже, використання запропонованої конструкції поплавкового гіроскопа забезпеченого від зон каустики дозволить, за допомогою нових властивостей, дієво підвищить захист герметичного гіровузла від збурення проникаючим зовнішнім акустичним випромінюванням і ударною N-хвилею гіперзвукових літальних апаратів, а це зменшить похибки вимірювань кутової швидкості літальних апаратів.

3.4. Компенсація впливу градієнту тепла рідинностатичної частини підвісу пасивними методами

Пропонується конструкція поплавкового гіроскопа, що належить до точного машинобудування, і може бути використаною в складі пілотажно-навігаційного обладнання гіперзвукової авіаційної техніки, яка при льотній експлуатації підвладна дії надвисоких температур, близько 2000°C , суборбітальних і атмосферних технологій.

Розглянуто поплавковий гіроскоп, який містить сферичний корпус із сферичною, частково заповненою робочою рідиною, порожниною і розміщений в корпусі гіровузол (поплавок) з опорами і датчиками кута і моментів [83].

Недолік даного поплавкового гіроскопа полягає в складності виготовлення та балансування внаслідок наявності в його конструкції деталей з поверхнями сферичної форми.

За основу запропонованої конструкції прийнято поплавковий гіроскоп, який містить циліндричний корпус з внутрішньою циліндричною, частково заповненою робочою рідиною, порожниною і розташованим в порожнині корпусу герметичним поплавковим підвісом з гіромотором та датчиками кута і моментів для визначення курсу, встановленим на опорах в торцях корпусу, на зовнішній частині корпусу розміщено тепловий кожух [84,85].

Розглянутий поплавковий гіроскоп простіший у виготовленні та балансуванні, але він недостатньо ефективно захищає герметичний поплавковий підвіс з гіромотором та датчиками кута і моментів від збурення надвисокими температурами гіперзвукового польоту, які через тепловий кожух і корпус надходять до частково заповненої робочою рідиною порожнини і розташованого в порожнині корпусу герметичного поплавкового підвісу з гіромотором та датчиками кута і моментів, породжують збурення герметичного поплавкового підвісу з гіромотором та датчиками кута і моментів, примусово обертають його навколо опор і слугуватимуть появі додаткових похибок вимірювань, що являється основним його недоліком, особливо в разі інтегруючого гіроскопа.

Зазначений недолік обумовлений тим, що робоча рідина з боку дії теплового збурення додатково нагрівається і створює рух теплових висхідних потоків в сторону більш прохолодних шарів, що порушує вихідний статичний стан робочої рідини і переводить її в нестационарний, неоднорідний за температурою, потік. Дія цього несиметричного потоку на поверхню поплавкового підвісу викликає його захоплення теплими

висхідними потоками, які примусово обертають його навколо опор, що породжує додаткові похибки вимірювань [84,85].

В основу запропонованої конструкції поставлена задача зменшення впливу на герметичний поплавковий підвіс з гіромотором та датчиками кута і моментів збурення надвисокими температурами гіперзвукового польоту шляхом дискретно-неперервного обладнання зовнішньої поверхні оболонкової частини герметичного поплавкового підвісу розміщеними в радіальних площинах однаковими поздовжніми плоскими ребрами заданого типорозміру, що зменшить збурення герметичного поплавкового підвісу з гіромотором та датчиками кута і моментів, ліквідує його примусовий обертальний рух навколо опор і слугуватиме зменшенню додаткових похибок вимірювань.

Поставлена задача вирішується тим, що в поплавковому гіроскопі, який містить циліндричний корпус з внутрішньою циліндричною, частково заповненою робочою рідиною, порожниною і розташованим в порожнині корпусу герметичним поплавковим підвісом з гіромотором та датчиками кута і моментів для визначення курсу, встановленим на опорах в торцях корпусу, на зовнішній частині корпусу розміщено тепловий кожух, новим є те, що зовнішня поверхня оболонкової частини герметичного поплавкового підвісу дискретно-неперервно обладнана розміщеними в радіальних площинах однаковими поздовжніми плоскими ребрами заданого типорозміру.

Зазначені відмітні ознаки забезпечують зміну форми оболонкової поверхні герметичного поплавкового підвісу з гіромотором та датчиками кута і моментів з гладкої, порівняно з основною конструкцією, на дискретно-неперервно обладнану розміщеними в радіальних площинах однаковими поздовжніми ребрами заданого типорозміру, що зменшить збурення герметичного поплавкового підвісу з гіромотором та датчиками кута і моментів, ліквідує його примусовий обертальний рух навколо опор і слугуватиме зменшенню додаткових похибок вимірювань.

На кресленні схематично зображений запропонований поплавковий гіроскоп в поздовжньому перерізі (рис.3.12) та поперечному перерізі (рис.3.13).

ПГ містить корпус 1 з циліндричною, діаметром D , порожниною 2, яка частково заповнена робочою рідиною 3. В порожнині 2 корпусу 1, розташований герметичний поплавковий підвіс 4 з гіромотором 5, який встановлюється на опорах 6 і має датчик кута 7 і датчик моментів 8 для визначення курсу. На зовнішній поверхні 9 корпусу 1 розміщений тепловий кожух 10. Зовнішня поверхня 11 оболонкової частини герметичного поплавкового підвісу 4 дискретно-неперервно обладнана розміщеними в радіальних площинах однаковими поздовжніми плоскими ребрами 12 заданого типорозміру.

Принцип роботи поплавкового гіроскопа виглядає наступним чином.

При дії на поплавковий гіроскоп теплового факелу 13, частина його відбивається від поверхні теплового кожуха 10 і прямує в протилежний від поплавкового гіроскопа бік, а інша частка проходить крізь тепловий кожух 10 і потрапляє на зовнішню поверхню 9 корпусу 1 віддаючи йому частку теплової енергії. Пройдешня частина прямує далі в середину порожнини 2 корпусу 1, заповненою робочою рідиною 3, нагріває її нижні шари, які, внаслідок цього, починають рухатися вгору, у бік прохолодних верхніх шарів, у вигляді висхідних теплових потоків 14 і 15. Потрапляючи на плоскі ребра 12, висхідні теплові потоки 14 намагатимуться повернути герметичний поплавковий підвіс 4 відносно опор 6 проти ходу стрілки годинника, а теплові потоки 15, навпаки, будуть прагнути повернути герметичний поплавковий підвіс 4 відносно опор 6 в напрямку ходу стрілки годинника і, тим самим, ліквідують його примусовий обертальний рух у переважному напрямку.

Таким чином, використання запропонованого поплавкового гіроскопа дозволить, за допомогою нових властивостей, за інших рівних з найближчим аналогом умов, перешкодить захопленню поплавкового підвісу теплими

висхідними потоками внаслідок дії надвисоких температур гіперзвукового польоту і зменшить збурення герметичного поплавкового підвісу з гіромотором та датчиками кута і моментів, ліквідує його примусовий обертальний рух навколо опор і слугуватиме зменшенню додаткових похибок вимірювань.

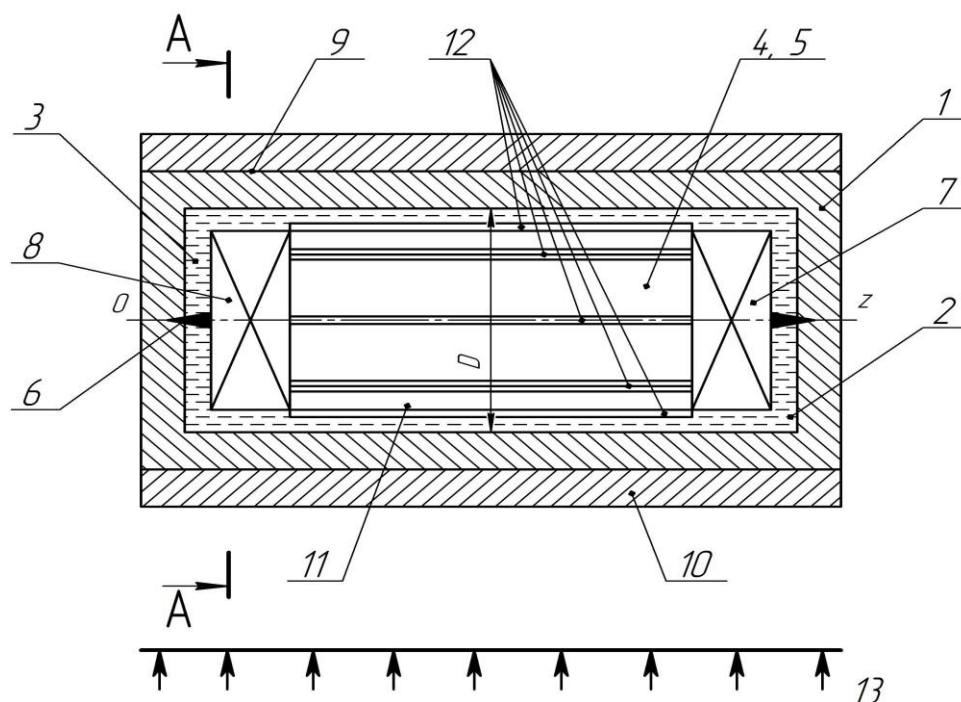


Рис. 3.12. Поплавковий гіроскоп в поздовжньому перерізі

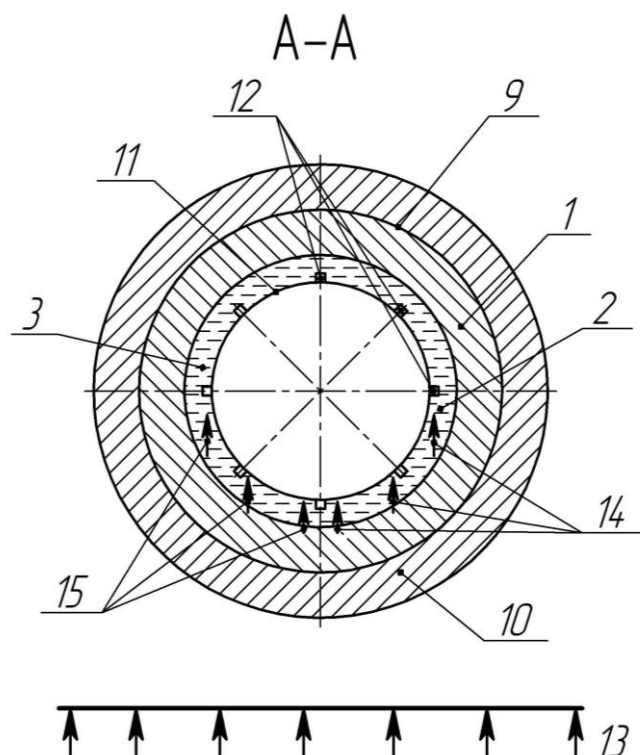


Рис. 3.13. Поперечний переріз гіроскопа

Висновки до розділу 3

Узагальнюючі результати, слід зазначити наступне:

1. Експериментальні напівнатурні випробування серійно випускаемого поплавкового гіроскопа класу ДУСУ2 надали можливість з'ясувати природу зміни вихідного статичного стану рідинної частини підвісу гіроскопа і, відповідно, обрати перспективні технічні рішення боротьби з цим впливом.

2. Дослідження елементарної частини оболонки внутрішньої порожнини корпусу ДУСУ2 у вигляді металевого кільця надали змогу практично довести наявність в рідинній складовій підвісу гіроскопа окрім циліндричної *zone kaustikos* ще і плоскої каустики в площині шпангоута корпусу. Особливістю плоскої каустики, як з'ясувалося, постає її структура у вигляді сукупності центральних секторів внутрішньої порожнини корпусу з різним рівнем енергетичної активності рідини – від статичного до турбулентного, що в котрий раз підтвердило не аби яку складність процесів в рідинній частині, що знаходиться в акустичному полі. В першу чергу, приймаючи до уваги, що акустичне випромінювання в рідину створює дифузне звукове поле і, тому, результати дії елементарної хвилі, наприклад плоскої, слід узагальнювати операцією осереднення по Перісу.

Структура енергетичного стану елементарної оболонки корпусу суттєво залежить від напрямку опромінювання зовнішнім акустичним променем, що знаходить відображення у геометричному розподілу в зоні активної і пасивної енергетики в центральних секторах проміжку.

3. Експериментальні дослідження довели що в замкнутому об'ємі порожнини корпусу при опроміненні має місце локальні і глобальні особливості руху рідини. Завдяки об'ємній нелінійності порожнини корпусу первинно-статичний стан рідини суттєво змінюється і набуває структуру потужного рушійного потоку у вигляді циркуляції, а також плинні локальні потоки значно меншої потужності. Установлений чинник стану рідини дозволяє ще глибше проаналізувати механізм появи додаткових похибок ДУСУ під дією акустичного випромінювання.

4. Експериментально доведена наявність висхідних теплових потоків у рідинній частині підвісу гіроскопа, які суттєво змінюють вихідний статичний стан та породжують градієнт тепла, який не може компенсуватися тепловим кожухом, тому, що причиною є проникаюче усередину акустичне випромінювання. Сукупність потужної циркуляції рідини під дією проникаючого акустичного випромінювання, а також породжений цією дією градієнт тепла і різної потужності висхідні теплові потоки неодмінно призводять до примусового руху поплавкового підвісу відносно вихідної осі, що опосередковано впливає на гіроскоп через виникаючий гіроскопічний момент і призводить до виникнення додаткових похибок інерціального сенсора.

РОЗДІЛ 4. КОМПЛЕКСНІ ЗАДАЧІ ВИКОРИСТАННЯ *ZONE KAUSTIKOS* НА РЕЗОНАНСНОМУ РІВНІ ХВИЛЬОВОГО СПІВПАДАННЯ

Здійснимо інтегральну оцінку перспективи використання штучного формуємих *zone kaustikos* для потреб бойової техніки та окреслимо ступінь технологічних ризиків експлуатаційних умов засобів оборони різного класу і визначимо шляхи їх усунення. Головна задача штучного формування *zone kaustikos* полягає у вирішенні проблеми маскуванню та обмеженої примітності на лінії оборони від засобів пеленгації. Проаналізуємо на макетах бойової техніки в напівнатурних умовах ефективність штучної *zone kaustikos* для вирішення визначених задач.

4.1. Відкриті фортифікаційні споруди у вигляді окопа для танка з обмеженим сектором обстрілу

Як відомо, вирішальне значення в польовій фортифікації займають укриття для бойової техніки і матеріальних засобів. Широкого вжитку набули споруди як відкритого, так і закритого типу. Перші є найбільш розповсюдженими і мають вигляд котлованів.

Для вогневих засобів, таких як такни, самохідні артилерійські установки, основним видом фортифікаційних споруд на позиції є окоп.

Раптовість застосування бойової зброї примножує його силу. І це завдання покликане вирішувати маскуванню. Сучасне маскуванню повинно забезпечити необхідний ефект скритності від повітряної розвідки противника, а також від його систем управління зброєю ураження.

4.1.1. Штучне формування zone kaustikos в оболонковому модулі фортифікаційної споруди відкритого типу

Об'єктом проведених досліджень слугує процес пружної взаємодії штучно формованого акустичного випромінювання з циліндричною оболонкою у вигляді двох співвісних циліндричних складових розділених рідиною, що утворюють своєрідний тунель, частково занурений в ґрунт навколо котловану окопу і апарелі (від фр. *appareil*).

4.1.2. Напівнатурні експериментальні дослідження ступеня маскування і обмеженої примітності вогневих засобів та екіпажу танку

Метою проведених досліджень була оцінка в лабораторних умовах перспективності технічного рішення маскування бойової техніки в фортифікаційних спорудах відкритого типу лінії оборони. Ідеологія досліджуваного технічного рішення ґрунтується на штучному формуванні огорожуючої вогневу техніку поверхні в вигляді зон каустики (*zone kaustikos*). З цією метою повинні бути вирішені задачі оцінки впливу хвильового розміру і хвильового збігу на ступінь забезпечення маскування, на прикладі танка в окопі, а також з'ясування його примітності. Проводиться оцінка ефективності технічного рішення на резонансному рівні [86].

4.1.3. Аналіз стану вивчаємої проблеми

Поява і розвиток бронетехніки, здатної захистити екіпаж і підтримати вогнем свої підрозділи призводить до створення і вдосконалення протитанкових засобів. Останнім часом з'явилося маса нових засобів захисту. Ще не так давно танку було достатньо мати високоякісну броню, яка охороняла б від куль та уламків. В роботі [87] викладено основи динаміки апаратів різних класів при вирішенні задач ехолокації. Аналітично обґрунтовуються шляхи створення акустично «невидимих» об'єктів при вирішенні задач виявлення і акустично «непрозорих» – при вирішенні задач супроводу.

Час не стоїть на місці і військова індустрія стрімко розвивається. Наприклад, відомий ракетний комплекс Spike-NLOS являє собою багатоцільову мультиплатформну електрооптичну ракетну систему, яка призначена для враження ворожої бронетехніки, добре захищених об'єктів (типу бункер, дот, дзот) та інших інженерних споруд, а також особового складу супротивника і його надводних цілей. Літом 2015 року Ізраїль офіційно підтвердив наявність раніше засекреченого виду військової техніки – мобільної ракетної установки на гусеничному шасі – Pereh. Виходячи з слів ізраїльських спеціалістів дана модель, оснащена протитанковими ракетами, змінює уявлення про ведення сучасних бойових дій. Це перша в світі загоризонтна протитанкова самохідна установка. Ефективний радіус дії даних ракет складає до 25 км. Вага однієї ракети в транспортному контейнері – 71 кг. На траєкторії польоту середня швидкість ракети складає 130-180 м/с, бронепроникність – до 1000 мм сталеві гомогенної броні. Данні ракети можуть ефективно використовуватися при температурі від -32 до +49 градусів Цельсія і зберігаються при температурі від -45 до +71 градуси Цельсія. В залежності від характеру задач що вирішуються можливе оснащення різними видами боєголовок – осколкової, кумулятивної чи багатофункціональної [88].

Запропоновано технічне рішення по вдосконаленню танка M60A3 під назвою Sabra – використання 120-мм гармат і сучасної цифрової системи керування вогнем. Проте дана модель має свої суттєві недоліки – гомогенна броня, порівняно низька маневреність [89].

Досвід локальних військових конфліктів дозволив розробити теорію у відповідності до якої сучасний танк, щоб домінувати на полі бою повинен відповідати цілому ряду досить важливих вимог, і створюватись на основі принципу «шести зон»: запобігти зіткненню, запобігти виявленню, запобігти захопленню на супровід, запобігти влучанню, запобігти проникненню, запобігти враженню. До засобів активного захисту в ближній зоні можливо віднести і контейнер з зенітними ракетами, що керуються за допомогою все

того ж «штучного інтелекту». Отримавши данні від БПЛА про використання по танку авіаційних засобів враження, він наводить на них ЗКРи з високим ступенем швидкодії і знищує їх при підльоті до танку, де «контроль за повітрям» здійснює вже його власний бортовий радар [90].

На протязі останніх десятиріч проводились численні теоретичні дослідження. В якості прикладів для останніх можна привести деякі результати американської програми FCS (Future Combat Systems – «Бойові системи майбутнього»). Результатом одного з досліджень в рамках програми FCS стала концепція Survivability Onion («Живучість цибулі») чи Onion Skin («Цибулева шкіра»). В цій концепції розглянутий принцип розділу захисту бронемашин на шість умовних «шарів»: Avoid Encounter («запобігти зіткненню»), Avoid Detection («запобігти виявленню»), Avoid Acquisition («запобігти супроводу»), Avoid Hit («запобігти влучанню»), Avoid Penetration («запобігти проникненню») и Avoid Kill («запобігти враженню»). Кожен з них стосується різних моментів атаки супротивника і пов'язаний з використанням певних систем, призначених для попередження тих чи інших ворожих дій [91-93].

Також пропонується еластичний полімер котрий повторює здатність шкіри кальмара та восьминога: змінює свій колір і текстуру поверхні. Камуфляж з такого еластоміру зможе сховати солдата чи бронемашину будь-де. Еластомірний камуфляж має один недолік: кожен тип еластоміру може відтворювати лише один шаблон текстури і кольору. Вчені створили простий мімікуючий камуфляж [94].

Таким чином, проблема маскуванню бронетанкової техніки являється найбільш важливою складовою бойового забезпечення і вирішення цієї задачі є надзвичайно актуальним [95].

Вивчається одна з технічних реалізацій маскуванню і обмеженої примітності вогневих засобів від повітряної розвідки. Розглянуто фортифікаційні споруди відкритого типу на лінії оборони в вигляді окопу для

танка з обмеженим сектором обстрілу. Окоп містить котлован, апарель (фр. *appareil*) и бруствер.

Пропонується оточити окоп і танк циліндричною оболонкою з двох співвісних фрагментів, котрі розділені рідиною. Таким чином, що нижня части оболонки частково занурена в ґрунт під котлованом. Впливаючи на навколишню оболонку акустичним променем, збуджуємо в її поверхні кругову хвилю, яка на частоті нижче граничної f_{cp} при виконанні умови великого хвильового співпадання зовнішньої оболонки, тобто

$$1 \ll kR, \quad (4.1)$$

де $k = \frac{\omega}{c_0}$ - хвильове число; ω - частота випромінювання; c_0 -

швидкість звуку в повітрі; R - радіус зовнішньої оболонки, приводить до випромінювання всередину, тобто в рідину, що розділяє оболонки, звукову хвилю під кутом аберації, кутом α (рис. 4.1) -

$$\cos \alpha = \frac{c_0}{V_{об}}, \quad (4.2)$$

де $V_{об}$ - швидкість окружної хвилі в оболонки. Створена цією умовою аберація випромінюваних звукових хвиль створює *zone kaustikos* в рідині в вигляді конфокальної внутрішній поверхні зовнішньої оболонки з поперечним перерізом в вигляді кола (рис. 4.1) –

$$\frac{x^2}{R^2 \cos^2 \left(\arcsin \frac{c_0}{V_{об}} \right)} + \frac{y^2}{R^2 \cos^2 \left(\arcsin \frac{c_0}{V_{об}} \right)} = 1 \quad (4.3)$$

При штучному формуванні хвильового збігу, зона каустики створює такий ступінь турбулентності, що стане непереборною перешкодою ехолокації і на екрані сенсора буде формуватися замість зображення контуру танка тільки розпливчата пляма.

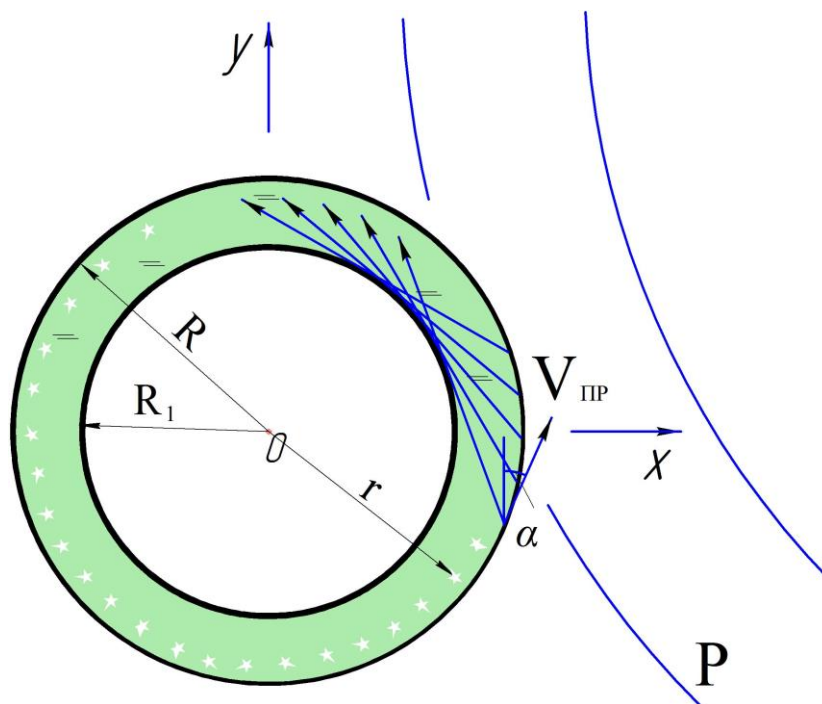


Рис. 4.1. Формування зони каустики

Звісно, для вирішення поставленої задачі можна використовувати не окружні, а згинні хвилі зовнішньої оболонки, але в цьому випадку почне чітко проглядатися периферія поверхні танка на екрані.

4.1.4. Лабораторний стенд для вивчення явища штучного формування огорожувальної поверхні

Головним елементом випробувального стенду можна вважати генератор акустичних коливань. Його функції покладені на ультразвукову установку промислового зразка, яка формує ультразвуковий промінь в 36 кГц (рис. 4.2) з плоским фронтом хвилі. Потужність випромінювання 300 Вт. Занурюваний блок ультразвукових випромінювачів складається з блоку ультразвукових випромінювачів виготовлених з нержавіючої сталі і ультразвукового генератора. На кришці блока всередині корпусу розміщено ультразвукові випромінювачі, які перетворюють електричну енергію в ультразвукові коливання. На задній стінці розміщено вивід мережевого кабелю. Занурюваний блок з'єднаний з ультразвуковим генератором.

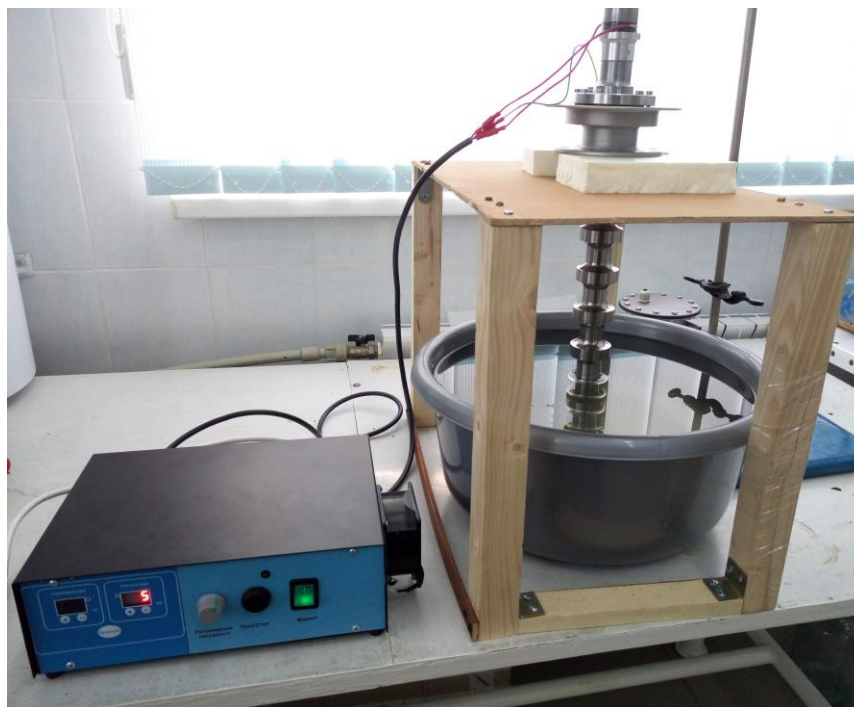


Рис. 4.2. Зовнішній вигляд лабораторної установки

4.1.5. Результати напівнатурних випробувань

Макет танка розміщується в круглій оболонці, що занурена в воду.

При вимкненому випромінюванні контури макету танка добре проглядаються на екрані (рис. 4.3, а). Ввімкнення ультразвукової установки формує в околі зовнішньої оболонки окружну хвилю, яка випромінює в розділяючу оболонки рідину звукову хвилю під кутом α до вектора швидкості окружної хвилі. Таким чином, створюється циліндрична *zone kaustikos* в рідині поблизу внутрішньої поверхні зовнішньої оболонки тунелю. Поверхня каустики, на відміну від статичного стану рідини, володіє підвищеним енергетичним станом, який проявляється у вигляді турбулентної структури (рис. 4.3, б). Зображення танка, завдяки цьому, набуває менш чіткі обриси, але, разом з тим, примітність випробуваного зразка достатня щоб провести його класифікацію як засобів вогневої техніки.

Змінюючи напрям ультразвукового променя по відношенню до нормалі зовнішньої оболонки при куті падіння в 5 *град* досягаємо появи резонансної обстановки, що виражається у вигляді «акустичної прозорості» зовнішньої оболонки [Додаток Е-1]. Це привід для істотного збільшення потужності

проникаючого всередину рідини ультразвукового променя, практично без дисипації звукової енергії, що дозволяє домогтися бажаного результату, а саме – перетворити зображення танка в розмиту пляму на екрані (рис 4.3, в).

Цікавим є також усунення зображень, на екранах сенсора локаторів, обрисів обслуговуючих військову техніку людей [Додаток Е-2]. Ефект невидимості персоналу і матеріального забезпечення вогневої техніки як і в першому випадку реалізується в тому ж обсязі і в тій же якості (рис. 4.4).

а)



б)



в)



Рис. 4.3. Зовнішній вигляд макета танка в оточуючому тунелі в полі дії ультразвукового випромінювання: а) вихідне положення випробуваної моделі, зовнішня оболонка тунелю не опромінюється ультразвуком; б) ультразвуковий генератор, що опромінює зовнішню оболонку оточуючого тунелю, ввімкнений, кут падіння променя значно відрізняється від кута збігу, хвильовий резонанс відсутній; в) напрям ультразвукового променя змінюється до настання резонансу – хвильового збігу по напрямку ультразвукового променя змінюється до настання резонансу - хвильового збігу по окружній хвилі.

а)



б)



в)



Рис. 4.4. Обслуговуючий персонал вогневої техніки: а) екіпаж танка спочатку налаштовує гармату баштового знаряддя для прицільної стрільби в потрібну точку сектора обстрілу; б) спотворення контурів екіпажу при формуванні зони каустики, хвильовий резонанс відсутній; в) зникнення контурів екіпажу на екрані сенсорів в момент формування резонансної обстановки – хвильового збігу

4.1.6. Аналіз результатів досліджень

Таким чином, досягається абсолютна відсутність не тільки контурів але і зображення військового підрозділу танка.

Наведені результати доводять ефективність запропонованого технічного рішення захисного тунелю для танка з обмеженим сектором обстрілу, що знаходить в фортифікаційних спорудах відкритого типу.

Чисельно встановлені значення необхідних параметрів лабораторної установки - хвильового розміру, хвильового збігу, кута аберації випромінюваних окружною хвилею в рідину звуковою хвилею, зони каустики досліджуваного явища. Доведено можливість маскування не тільки військової техніки на позиціях, але також і військових підрозділів екіпажу.

Прийняте технічне рішення щодо забезпечення необхідного рівня маскування і допустимої примітності вогневих засобів лінії оборони, перевірене на лабораторній установці, відкриває можливості для подальшого розширення і поглиблення, подальшого вдосконалення технічного рішення в бойових умовах, які передбачають гарантоване маскування і обмежену примітність вогневої техніки від повітряної розвідки противника.

Перш за все це пов'язано з можливістю дистанційного керування і регулювання бойової техніки і матеріально-технічного забезпечення не тільки на позиціях, а й під час бойових дій.

Запропоноване технічне рішення дозволяє істотно впливати на рівень раптового використання вогневих засобів в бойових умовах, а також формувати на лінії оборони хибні фортифікаційні споруди відкритого типу з дистанційним управлінням, що також може служити перевагою сторони що обороняється та ізоляції ехолокаційних засобів повітряної розвідки.

4.2. Стратегічна бомбардувальна та тактична палубна авіація

Льотні випробування гіперзвукової зброї дають підстави для реальної зміни вигляду сучасної війни і зроблять практично безпорадними засоби ППО. В черговий раз військові технології випередили час і ставлять нові питання про безпеку мільярдів жителів *Землі* [96] (рис. 4.5).



Рис. 4.5. Гіперзвуковий ЛА на бойовому чергуванні

США і Китай працюють над проектами гіперзвукових глайдерів, які отримують початкове прискорення за рахунок підйому на велику висоту за допомогою ракети-носія, а потім розганяються під час керованого спуску з великих висот. Переваги подібної системи визначаються, по-перше, великою дальністю, **аж до глобального удару по будь-якій точці поверхні Землі**, по-друге, порівняно простим влаштуванням глайдера (немає маршового двигуна), по-третє, великою масою бойової частини і, нарешті, високою швидкістю польоту, більше 10 М.

Росія зосередилася на розробці ракет з гіперзвуковим прямоточним повітряно-реактивним двигуном (ГППРД), які можуть запускатися з *Землі*, кораблів або бойових літаків. Існує російсько-індійський проект по розробці подібних систем зброї, так що до 2023 р. Індія також зможе увійти в "*Гіперзвуковий клуб*". Перевага гіперзвукових ракет полягає в меншій вартості і більшій гнучкості застосування, на відміну від глайдерів, що запускаються за допомогою МБР [97].

Гіперзвукові літальні апарати заходять на *ціль* по відносно похилій траєкторії, знаходяться в повітрі короткий час і можуть маневрувати. У більшості сценаріїв сучасні системи ППО не в змозі за короткий проміжок часу виявити і вразити гіперзвукову *ціль*.

Звідси окреслюється головна задача - максимально ускладнити для розвідки виявлення і окреслення примітності засобів оборони. Це, в свою

чергу, забезпечить несподіваність противником застосування вогневої зброї. Використовуючи відоме твердження “Здивувати - значить перемогти.”, буде закладено надійний фундамент перемоги. Маскування - це вирішальний засіб для введення в оману противника і головний фактор переможного етапу.

4.2.1. Маскування палубної авіації від засобів пеленгації повітряної розвідки

Об'єктом досліджень є процес пружної взаємодії ультразвукового променя з огорожувальним циліндричним модулем у вигляді двох кругових оболонок однакової довжини співвісно з'єднаних своїми торцями, герметичний проміжок між ними заповнений рідиною.

Опромінення зовні ультразвуковим променем впливає на властивості огорожуючого циліндричного модуля, зокрема, на виникнення локальних особливостей зовнішньої оболонки, а також на зміну енергетичного стану рідинно-статичного проміжку між оболонками.

Розрахункова модель відповідає технічному рішенню у вигляді огорожуючого циліндричного модуля. Досліджуване явище є продукт забезпечення маскування палубної авіації від повітряної розвідки в експлуатаційних умовах.

4.2.2. Укриття льотних виробів подвійною оболонкою з конфокальною zone kaustikos

Метою проведених досліджень є оцінка ефективності розглянутого технічного рішення для досягнення повного (або часткового) маскування і обмеженої примітності палубної авіації від повітряної розвідки.

Задачі проведених досліджень полягають у наступному:

- побудова розрахункової аналітичної моделі обраного технічного рішення в вигляді двох співвісних оболонок розділених рідиною і опромінюваних зовні ультразвуковим променем;
- обґрунтування необхідності виконання умови великого хвильового розміру поверхні зовнішньої оболонки;

- з'ясування умов необхідного ступеня аберації випромінюваних в рідину окружною хвилею зовнішньої оболонки звукових хвиль і формування поверхні каустики;
- визначення кута падіння ультразвукового променя на поверхню зовнішньої оболонки необхідного для виникнення резонансної обстановки в механічній системі - хвильового збігу (геометричного резонансу).

4.2.3. Аналіз стану вивчаємої проблеми

Час неминуче виділив вирішальні пріоритети в створенні способів оборони і маскування льотних пілотованих і безпілотних (літаючих роботів) виробів. Маскування (від фр. *masquer*) передбачає забезпечення часткової або повної непомітності, або скритності, матеріально-технічних засобів оборонного призначення, а також військового складу. Маскування забезпечує раптовість дій військ, ударну та вогневу міць вогневої техніки, продовження їх боєготовності та підвищення живучості. За масштабами застосування та характером вирішуваних завдань маскування підрозділяється на - *стратегічне, оперативне і тактичне*. Залежно від того, від яких технічних розвід-диверсійних засобів здійснюються маскувальні заходи, розрізняють маскування оптичне (маскувальне фарбування) [97], теплове, радіолокаційне [98], радіо і радіотехнічне, звукове (акустичне – прямої локації і ехолокації), засоби спеціальної гідроакустики (підкільні станції, що опускаються і буксировані контейнери з антенами змінної глибини) і ін [99].

Основними способами маскування є приховування, імітація і демонстративні дії.

Приховування полягає в усуненні або ослабленні демаскуючих ознак. Приховування забезпечується дотриманням маскувальної дисципліни, використанням маскувальних властивостей місцевості, природних умов і застосуванням спеціальних інженерно-технічних прийомів і засобів.

Імітація полягає в створенні хибних об'єктів і помилкової обстановки шляхом використання макетів техніки та інших засобів [98].

В 1932 році І.І. Варшавський запропонував зробити літаки невидимими в повітрі для наземного спостерігача, тобто створити дзеркальне маскування, а також провести роботи по захисту металів від корозії [100].

Пропонується також проводити приховування об'єктів за допомогою димомаскування (аерозольні утворення) - димові завіси застосовуються для приховування об'єктів від візуально-оптичних засобів противника. Для виключення визначення точного місця розташування об'єкта застосовуються димові завіси, що в кілька разів перевищують розміри об'єкта. Але на ефективність маскуванню за допомогою диму слід звертати увагу на метеорологічні умови (швидкість і напрям вітру, опади), а також на характер місцевості (рельєф, рослинний покрив, річки, озера, населені пункти) [101].

Розвиток підходів до радіолокаційної невидимості призвело до створення літаків-невидимок на основі технології типу «Стелс» [102]. Однак ця технологія не стала вирішенням проблеми і необхідні більш глибокі дослідження і оригінальні підходи для досягнення поставленої мети – скритності бойової машини. Маскування літака за допомогою створення перешкод і відображень – це метод швидше допоміжний, оскільки не може вирішити задачу «зникнення» літака з радарів противника. Російськими дослідниками було запропоновано свій метод для маскуванню літака – активний метод. Якщо в американській технології «Стелс» для зниження радіовидимості використовуються спеціальні поглинаючі покриття, то тут задіяна своя технологія, яка для тих же цілей використовує штучне плазмове утворення, отримане за допомогою викиду в атмосферу електронних пучків (рис. 4). Поблизу літака створюються плазмові хмари, які активно поглинають електромагнітну хвилю, завдяки чому видимість літака на екрані радара падає більш ніж в 100 разів [103].

4.2.4. Матеріали та методи дослідження

Таким чином, беручи до уваги, що літаки тактичної палубної авіації базуються на відкритих стартових позиціях, виникають особливості та специфіка засобів маскування літаків від повітряної розвідки противника. Відомі шляхи вирішення завдань маскування і обмеженої примітності контурів льотних виробів, засновані на пасивних методах, дозволяють прийти до висновку, що найбільш перспективними є все-таки засоби, засновані на резонансних явищах різної фізичної природи. Представлені в матеріалі дослідження авторів про засоби маскування за допомогою штучно формованих огорожувальних поверхонь у вигляді зон каустики є досить простим і ефективним для досягнення поставленої мети.

Основою випробувального стенду є занурений блок ультразвукових випромінювачів марки УЗП-6-1 (Україна), який формує ультразвуковий промінь частотою 36 кГц з плоским фронтом, потужністю 300 Вт і інтенсивністю ультразвукових коливань $1,65 \text{ Вт} / \text{см}^3$.

Всередині, заповненого водою, корпусу випробувального стенду, розташований циліндричний модуль у вигляді двох кругових оболонок, розділених рідиною.

Експериментальна установка складається з ультразвукового генератора і ультразвукового перетворювача. Ультразвуковий перетворювач являє собою погрузний блок, який встановлюється в ємності з робочою рідиною.

Ультразвуковий перетворювач виготовлений з нержавіючої сталі і складається з 6 ультразвукових випромінювачів, які перетворюють електричну енергію в ультразвукові коливання. Погрузний блок з'єднаний з ультразвуковим генератором і встановлено в ємності, і повністю покритий робочою рідиною.

4.2.5. Результати напівнатурних випробувань

При відсутності опромінення ультразвуковим променем зовнішньої оболонки огорожувального циліндричного модуля у вигляді двох кругових оболонок на екрані сенсора пеленгатора глайдера проявляються чіткі зображення літака тактичної палубної авіації (рис. 4.6, а). Для отримання

необхідного ефекту маскування під захистом поверхні зони каустики необхідно виконання двох умов - значного хвильового розміру зовнішньої оболонки огорожувального циліндричного модуля у вигляді двох кругових оболонок і підбору кута збігу променя ультразвукового генератора [65,66].

Перша умова дозволяє при значному хвильовому розмірі, тобто більшим декількох одиниць, розглядати елемент зовнішньої оболонки огорожувального циліндричного модуля у вигляді двох кругових оболонок як пластину, яка випромінює в міжоболонкову рідину звукову хвилю. Явище аберації можна регулювати відповідним підбором матеріалу зовнішньої оболонки і рідини, таким чином, щоб співвідношення швидкостей поширення звуку в них давали можливість побудувати зони каустики у вигляді конфокальної поверхні оболонки огорожувального циліндричного модуля у вигляді двох кругових оболонок заданого радіуса. Очевидно, що при незначному значенні хвильового розміру механізм побудови ізолюючої поверхні не буде спрацьовувати. На рис. 4.6, б продемонстровано початкову зміну примітності контурів літака тактичної палубної авіації. Ці зміни, як видно, ще не носять принципового характеру, разом з тим мають місце.

а)



б)

в)



Рис. 4.6. Зображення досліджуваного зразка літака: а) вихідне положення, опромінення ультразвуковим променем огорожувального циліндричного модуля у вигляді двох кругових оболонок відсутня; б) зображення літака при зовнішньому штучному акустичному випромінюванні огорожувального циліндричного модуля у вигляді двох кругових оболонок (поза зоною резонансу); в) зображення літака на екрані сенсора пеленгатора глайдера при настанні резонансної обстановки в міжоболонковому просторі - хвильовий збіг

Підбір кута падіння ультразвукового променя на поверхню зовнішньої оболонки огорожувального циліндричного модуля у вигляді двох кругових оболонок до значень кута збігу, тобто до настання геометричного резонансу у вигляді хвильового збігу дозволяє розвинути далі спотворення корпусу на екрані пеленгатора глайдера, літака тактичної палубної авіації (рис. 4.6, в). Це досягається за рахунок того, що турбулентність і енергетична активність міжоболонкової рідини в умовах резонансу виростає до такого рівня, коли примітність контурів практично зникає і забезпечується задовільне маскування літака тактичної палубної авіації від засобів пеленгації глайдера [Додаток Е-3]. Механізм цього явища обумовлений різким збільшенням потужності ультразвукового променя пройдешнього всередину і генерованої ним звукових хвиль внаслідок настання так званої акустичної прозорості

зовнішньої оболонки огорожувального циліндричного модуля у вигляді двох кругових оболонок [59,68,86].

У момент старту літаків тактичної палубної авіації, який огорожує модуль відсувається, звільняючи місце для вертикального старту літака. Після повернення літака на базу і посадки на палубу авіаносця, який огорожує циліндричний модуль повертається у вихідне положення, закриваючи при цьому повністю літак, і, виконуючи при цьому свою основну спрямованість - забезпечення маскування льотного апарату.

Оригінальною стороною отриманих результатів лабораторних досліджень є підтвердження теоретичних передумов технічної реалізації штучного формування огорожувальних поверхонь у вигляді зон каустики (рис. 4.1) для приховування та маскування літака тактичної палубної авіації.

4.2.6. Аналіз результатів досліджень

Проведені лабораторні дослідження макета літака з метою забезпечення його маскування, а також обмеженої примітності для повітряної розвідки противника на стартовому майданчику в передбаченою конструкцією шкафуті корабля і обмежених ютом і напівютом, дозволяють провести оцінку ефективності пропонованого технічного рішення і перспектив досягнення скритності палубної авіації, як засіб раптовості бойових дій.

Основні результати можна окреслити наступним чином:

- розрахункові моделі обраного технічного рішення дозволяють з належною мірою адекватності проаналізувати природу досліджуваного явища і виробити практичні рекомендації щодо поліпшення його функціонування;
- необхідність виконання умови великого значення хвильового розміру є наслідком необхідності подання елементів зовнішньої оболонки огорожувального циліндричного модуля у вигляді сукупності плоских елементів, що досягається або збільшенням радіуса зовнішньої оболонки, або зміною відповідних швидкостей звуку в оболонці і розділяючої оболонки рідини, або і того і іншого чинника одночасно. У цьому випадку

забезпечується випромінювання тепер уже плоским елементом оболонки огорожувального циліндричного модуля всередину рідини і звукових хвиль з обумовленим ступенем аберації;

- зміна складу фізичних властивостей розділяючої рідини і матеріалу зовнішньої оболонки огорожувального циліндричного модуля визначають кут відхилення випромінюваних в рідину звукових хвиль у вигляді співвідношення $\sin \alpha = \frac{c}{V}$ [66];

- досягнення великого хвильового розміру зовнішньої оболонки огорожувального циліндричного модуля підтверджує правомочність наданням елементарного відрізка її поверхні у вигляді пластини, що дозволяє скористатися відомими співвідношеннями настання резонансної обстановки взаємодії акустичної хвилі і пластини у вигляді хвильового збігу і формування умови акустичної прозорості перепони, коли енергія ультразвукового променя буде практично без втрат (без дисипації) проходити в міжоболонкове акустичне середовище.

4.3. Маскування субмарини від засобів пеленгації

У підводників є приказка, яка говорить, що існують тільки два типи кораблів – **ПІДВОДНІ ЧОВНИ** і **МІШЕНІ**. Ці слова близькі до істини, оскільки підводні кораблі на сьогоднішній день є найбільш скритною і руйнівною бойовою одиницею з усього великого спектру знарядь війни коли-небудь створених людством.

ВМС *США* розробляють інноваційну силову установку для перспективних атомних ракетноносців. Нова ядерна енергоустановка буде практично безшумною і зможе працювати 50 років без перезарядки.

Субмарина, яка замінить існуючі підводні ракетноносці класу "*Огайо*", отримає абсолютно нову ядерну силову установку без механічної трансмісії. Це зробить роботу двигуна безшумною, а можливе поєднання з водометним рушієм (pump-jet) – дозволить зробити підводний човен практично

безшумним. Крім того, реактор нового підводного човна зможе працювати на одній заправці 50 років, тобто весь термін служби субмарини.

Енергія реактора в новій підводному човні не поступатиме від турбін через трансмісію на гребні гвинти, як в сучасних підводних човнах. Замість цього, реактор буде виробляти електроенергію, яка буде безпосередньо надходити в електромережу підводного човна. Це не тільки знизить шум (для підводного човна це головний демаскуючий фактор), але і дозволить знімати з реактора більше енергії. В даний час, від 75 до 80% потужності реактора атомного підводного човна використовується для забезпечення руху. У новому підводному човні вільної потужності буде більше, що дозволить використовувати і більш потужні сонари, нову електроніку і безпілотні апарати.

Сучасні субмарини (від лат. Submarina) класу "*Огайо*" зараз є найпотужнішою зброєю на планеті. Водотоннажність майже 19 тис. тон, дві турбіни по 30 тис. к.с., 24 балістичні ракети *Трайдент II* (D5) з дюжиною боєголовок в кожній або 154 крилаті ракети *BGM-109 "Томагавк"* [104].

Основні бойові якості сучасних надводних кораблів - це великий запас ходу, потужна ППО, здатність прийому на борт безпілотних і пілотованих літальних апаратів. На жаль, надводні кораблі уразливі все ж перед протикорабельними ракетами і, до того ж, дуже помітні. На відміну від них, субмарини мають високий ступінь *скритності* і кращою *захищеністю від ракет*. Правда, доводиться платити за все це невисокою швидкістю руху «нижче перископної глибини» і неможливістю використання палубної авіації [105].

У бойових умовах або при виконанні розвід-диверсійних завдань, однією з найважливіших операцій видається достатня скритність субмарини.

Цій меті служать технічні засоби, що виключають ефективність пеленгації субмарини - визначення дистанції, пеленг, кут місця.

4.3.1. *Zone kaustikos* як укриття для човнів підводного флоту

Об'єктом досліджень є процес пружної взаємодії ультразвукового променя з пружною оболонкою і причини виникнення особливостей резонансного типу в багатофазній оболонковій структурі [105].

Опромінення ультразвуковим променем зовнішньої поверхні системи двох співвісних оболонок, розділених спеціально підбраною рідиною з необхідними характеристиками швидкості розповсюдження звуку в ній, дозволяє сформувати конфокальну оболонці поверхню каустики і окреслити умови прийнятні аберації випромінюваної зовнішньою оболонкою звукових хвиль, за умови виконання вимоги значного хвильового розміру зовнішньої оболонки.

Регулювання напрямку ультразвукового променя щодо нормалі до поверхні зовнішньої оболонки дає можливість увійти в зону хвильового збігу, коли проявляються локальні особливості механічної системи у вигляді трансляції енергії ультразвукового випромінювання без дисипації енергії, що служить істотному збільшенню енергетичної активності, рідини що розділяє оболонки. Таке явище прийнято називати «акустичною прозорістю» оболонки.

Штучно сформована турбулентність зони каустики у досліджуваних технічній реалізації двох-співвісної оболонкової конструкції слугує штучно створюваною перешкодою для засобів пеленгації підводного човна гідроакустичними станціями з антенами змінної глибини (ГАС с АЗГ). Передбачається, що ізолюючий тунель з двох співвісних оболонок розділених рідиною знаходиться в стаціонарному положенні і всередину його заходить субмарина і знаходиться в ньому також у фіксованому стані, при повній відсутності ходу [105].

На екранах сенсорів локаційних систем противника, таким чином, буде зображено розмиту пляму, що поглинає контури і особливості поверхні підводного човна. Таким чином, дезінформація істинної картини, істотно зменшує небезпеку глибинного бомбометання по результатам пеленгації ГАС с АЗГ кораблями противника субмарини і досягається більш високий

ступінь живучості підводного апарату і ефективність його бойових можливостей, що транслює неправдиві зображення підводної ситуації [105].

4.3.2. Об'ємна нелінійність подвійної оболонки заповненої рідиною для вирішення задач маскування і обмеженої примітності підводних човнів

Метою проведених лабораторних досліджень макета є підтвердження технічної можливості маскування і обмеженої примітності субмарини від засобів пеленгації противника, а також вибрати потрібний режим маскування і інтенсивності зон каустики [105].

Завдання проведених досліджень полягають у наступному:

- побудова розрахункової аналітичної моделі обраного технічного рішення в вигляді двох співвісних оболонок розділених рідиною і опромінюваних зовні ультразвуковим променем;
- обґрунтування необхідності виконання умови великого хвильового розміру поверхні зовнішньої оболонки;
- з'ясування умов необхідного ступеня аберації випромінюваних в рідину окружною хвилею зовнішньої оболонки звукових хвиль і формування поверхні каустики;
- визначення кута падіння ультразвукового променя на поверхню зовнішньої оболонки необхідного для виникнення резонансної обстановки в механічній системі – хвильового збігу (геометричного резонансу).

4.3.3. Аналіз стану вивчаємої проблеми

Передові морські держави НАТО володіють всілякими розвідувальними комплексами (космічними, авіаційними, корабельними, стаціонарними береговими і підводними), забезпеченими радіотехнічними, гідроакустичними, фотографічними та магнітометричними засобами в різній комбінації. Це дозволяє вирішувати питання розвідки постійно, в будь-який час доби і незалежно від погодних умов. Недостатньо уваги приділяється проблемам приховування і імітації - способи маскування, які відіграють

важливу роль в усуненні і ослабленні демаскуючих ознак підготовки сил флоту до бойової підтримки. Приховування, як відомо, - це усунення або послаблення демаскуючих ознак розташування і діяльності сил і різних об'єктів. Імітація полягає у відтворенні демаскуючих ознак, притаманних силам і об'єктам, шляхом позначення їх за допомогою неправдивих споруд, макетів, світло- і радіоімітації та інших засобів [106].

Оптичне маскування - найбільш рання (але не втративши своєї актуальності до теперішнього часу). Однак до появи оптико-електронних засобів розвідки (телевізійних, приладів нічного бачення, тепловізорів, тепlopеленгаторів і ін.) вона зводилася лише до зменшення помітності самих кораблів і їх специфічних ознак від візуального спостереження і ґрунтувалася головним чином на використанні умов обмеженої видимості, масок, на фарбуванні надводних поверхонь кораблів фарбами, неконтрастними по відношенню до оптичного фону району дій, на маскувальному фарбуванні – камуфляжі. Також широко застосовувалися димо- та світломаскування.

Використання оптико-електронного маскування зводиться до приховування від оптико-електронних засобів розвідки противника бойової техніки і об'єктів, шляхом використання маскувальних властивостей навколишнього середовища, темного часу доби, метеоумов, що обмежують можливості цих засобів, штучних масок, димів, аерозолів, а також проведенням заходів щодо світломаскування, установкою макетів.

Теплова маскування обмежує виявлення сил засобами теплової розвідки і ураженню боєприпасами з тепловими головками самонаведення (ГСН). Досягається вона за допомогою приховуючих властивостей навколишнього середовища, спеціальних покриттів, фарб, екрануванням нагрівальних поверхонь непрозорими для ІЧ випромінювання перешкодами, застосуванням хибних теплових цілей. Для зменшення теплової помітності корабля використовують пристрої, які розпилюють струмені морської води, що маскують покриття з дифузним відображенням інфрачервоного випромінювання, аерозольні утворення, одержувані з різних

піноутворюючих високомолекулярних речовин, а також інфрачервоні хибні цілі. Теплове маскування забезпечує, з одного боку, скритність дій сил, а з іншого – їх захист від засобів ураження, оснащених інфрачервоними головками самонаведення. Теплові засоби маскування використовуються, як правило, в комплексі з радіолокаційними, так як одні й ті ж розвідувальні системи і засоби ураження можуть бути оснащені як інфрачервоною, так і радіолокаційною апаратурою.

Радіолокаційне маскування – комплекс заходів, спрямованих на приховування військової техніки та об'єктів від радіолокаційного виявлення противника. Вона знайшла поширення вже в роки другої світової війни в зв'язку з впровадженням радіолокаційної техніки на кораблях і літаках ВМС ворогуючих сторін. У той час склалися, а потім отримали подальший розвиток такі методи приховування сил і об'єктів від радіолокаційного спостереження, як використання умов, що знижують дальність виявлення цілі за допомогою РЛС, створення радіолокаційних перешкод і масок, застосування кутових відбивачів для імітації помилкових об'єктів.

В ході минулих воєн і військових конфліктів склалися два методи радіомаскування - пасивний і активний.

Вперше металізовані стрічки для створення пасивних перешкод РЛС ППО застосували англійці в липні 1943 року під час нальоту авіації на Гамбург. 3 жовтня 1943 року на американських літаках стали широко використовуватися передавачі активних перешкод «Карпет». Втрати авіації різко знизилися. А комбіноване застосування пасивних і активних радіолокаційних перешкод дозволило знизити ефективність засобів ППО противника в 4-5 разів.

Істотний вплив на усунення або ослаблення демаскуючих ознак кораблів є гідроакустичне маскування. Воно здійснюється з метою приховування підводних човнів (ПЧ) і надводних кораблів від гідроакустичних засобів противника. Це досягається застосуванням звукоізоляційних і звукопоглинаючих пристроїв і матеріалів, використанням малошумних

швидкостей ходу підводного човна і укриттям його під шаром стрибка (шар води, що різко знижує можливості гідролокатора по виявленню ПЧ), вимиканням сильно шумних допоміжних механізмів, а також застосуванням імітаторів шуму.

У міру вдосконалення засобів розвідки і морських систем озброєнь розвиваються види, способи і засоби маскування, спрямовані на усунення або ослаблення демаскуючих ознак.

Мініатюрний прилад «Віст-2» служить акустичною перешкодою і глушить головки самонаведення торпед і гідролокатори субмарин [107].

Відомі методи маскування підводного апарату за допомогою зміни щільності води в сліді апарату. Це досягається підвищенням її солоності і шляхом охолодження силової установки більш солоною водою, ніж заборотної, і скидання її у слід. Таким чином, досягається зниження розрізнення сліду судна [108].

Також використовуються засоби імітації підводних човнів [109].

Забезпечення скритності підводних човнів розглядається в роботах [110-112] і забезпечується створенням в морському бойовому рухомому комплексі у вигляді надводного судна і з'єднаної з ним з можливістю розстикування підводного човна з'єднувальний елемент виконаний відокремлюваним від підводного човна. Він має позитивну плавучість і магістралі для повітрообміну і спостереження за надводною обстановкою, що з'єднуються з відповідними магістралями надводного судна. З підводним човном тросами з приводами з'єднані також елементи негативної плавучості, що компенсує позитивну плавучість підводного човна, при цьому підводний човен може переміщатися по тросах, змінюючи своє занурення [111].

4.3.4. Матеріали та методи дослідження

Відомі шляхи вирішення завдань маскування і обмеженої примітності контурів субмарин, засновані на пасивних методах, дозволяють прийти до висновку, що найбільш перспективними є все-таки засоби, засновані на резонансних явищах різної фізичної природи. Представлені в матеріалі дослідження авторів про засоби маскування за допомогою штучно формованих огорожувальних поверхонь у вигляді зон каустики є досить простим і ефективним для досягнення поставленої мети.

Як уже зазначалося, незаперечною перевагою субмарини, як об'єкта військових дій, є її *скритність*. З іншого боку, до найбільш істотних недоліків можна віднести «*сліпоту*» і *шумність* підводного апарату. Перший недолік зникає тільки при виході субмарини на перископну глибину, другий - тільки при відсутності власного ходу апарату.

Гідроакустичні станції з антенами змінної глибини прослуховують заданий район акваторії на предмет виявлення підводної *цїлі*. Інформація про основні параметри підводного човна, а саме, пеленг, кут місця, дистанція повідомляється диспетчеру військового підрозділу і звітти надходить на есмінець, який направляється за місцем знаходження човна для здійснення глибинного бомбардування.

4.3.5. *Результати напівнатурних випробувань*

У цій статті пропонується один з варіантів технічного рішення забезпечення належного маскування субмарини (при обов'язковому дотриманні відсутності власного ходу). Це технічне рішення являє собою створення своєрідної нори у вигляді циліндричного тунелю, в якому човен буде знаходитися на якорі. Поверхня тунелю представляється у вигляді двох співвісних оболонок, заповнених рідиною і опромінюються зовні ультразвуковим променем. Останній формує, при певних умовах, в рідині оболонки тунелю зону каустики, яка служить перепорою пеленгаційним системам.

Представлене технічне рішення в лабораторних умовах повторює початкову ідеологію. У лабораторних умовах на макеті оцінюється

принципова можливість досягнення бажаної мети забезпечення маскування і обмеженої примітності субмарини на будь-якій глибині. В якості зовнішнього опромінювача використовується генератор ультразвукового променя частотою 36 кГц і потужністю 650 Вт (рис. 4.2) [69].

При відсутності опромінення ультразвуковим променем зовнішньої оболонки тунелю на екрані сенсора пеленгатора проявляються чіткі зображення субмарини (рис. 4.7,*а*). Для отримання необхідного ефекту маскування під захистом поверхні зони каустики необхідно виконання двох умов - значного хвильового розміру зовнішньої оболонки тунелю та підбору кута збігу променя ультразвукового генератора.

Перша умова дозволяє при значному хвильовому розмірі, тобто більшим декількох одиниць, розглядати елемент зовнішньої оболонки тунелю як пластину, яка випромінює в міжоболонкову рідину звукову хвилю. Явище аберації можна регулювати відповідним підбором матеріалу зовнішньої оболонки і рідині таким чином, щоб співвідношення швидкостей поширення звуку в них давали можливість побудувати зони каустики у вигляді конфокальної поверхні оболонки тунелю заданого радіуса. Очевидно, що при незначному значенні хвильового розміру механізм побудови ізолюючої поверхні не буде спрацьовувати. На рис. 4.7,*б* продемонстровано початкове зміну примітності контурів корпусу підводного апарату. Ці зміни, як видно, ще не носять принципового характеру, разом з тим мають місце.

Підбір кута падіння ультразвукового променя на поверхню зовнішньої оболонки тунелю до значень кута збігу, тобто до настання геометричного резонансу у вигляді хвильового збігу дозволяє розвинути далі спотворення корпусу на екрані пеленгатора субмарини (рис. 4.7,*в*). Це досягається за рахунок того, що турбулентність і енергетична активність міжоболонкової рідини в умовах резонансу виростає до такого рівня, коли примітність контурів практично зникає і забезпечується задовільне маскування субмарини від засобів пеленгації [Додаток Е-4]. Механізм цього явища обумовлений різким збільшенням потужності ультразвукового променя

пройдешнього всередину і генерованих ним звукових хвиль внаслідок настання так званої акустичної прозорості зовнішньої оболонки тунелю [59, 86].

Оригінальною стороною отриманих результатів лабораторних досліджень є підтвердження теоретичних передумов технічної реалізації штучного формування огорожувальних поверхонь у вигляді зон каустики для приховування та маскуванню підводних виробів військового призначення.

Пропонована технічна реалізація не є єдиною можливою для досягнення поставленої мети маскуванню субмарини, її недосконалість можна класифікувати як малорухливу огорожувальну поверхню, яка передбачає стаціонарний стан огорожувального тунелю. Разом з тим, представляється можливим зробити огорожуючий тунель здатним змінювати свою підводну дислокацію і по глибині і в азимут.

а)



б)

в)



Рис. 4.7. Зображення досліджуваного зразка субмарини: а) вихідне положення, опромінення ультразвуковим променем ізолюючого тунелю відсутнє; б) зображення субмарини при зовнішньому штучному акустичному випромінюванні оболонки тунелю (поза зоною резонансу); в) зображення субмарини на екрані сенсора пеленгатора при настанні резонансної обстановки в міжоболонковому просторі - хвильовий збіг

Наявність запропонованих огорожувальних тунелів у вигляді нір, дозволяє підвищити показник життєзабезпечення субмарини і певним чином забезпечити більш високу раптовість використання її бойового комплекту у вигляді різного типу носіїв боєголовок, зокрема, крилатих протикорабельних ракет.

4.3.6. Аналіз результатів досліджень

Проведене лабораторне дослідження макета субмарини з метою забезпечення її маскування і обмеженої примітності в бойових умовах дозволяє провести оцінку життєздатності пропонованого технічного рішення і перспектив підвищення ефективності та життєзабезпечення даного виду озброєння. Основні результати можна сформулювати у вигляді:

- розрахункові моделі обраного технічного рішення дозволяють з належною мірою адекватності проаналізувати природу досліджуваного явища і виробити рекомендації щодо поліпшення його функціонування;

- необхідність виконання умови великого значення хвильового розміру є породженням уявлення елементів зовнішньої оболонки тунелю у вигляді сукупності плоских елементів, що досягається або збільшенням радіуса зовнішньої оболонки, або зміною відповідних швидкостей звуку в оболонці і розділяючої оболонки рідини, або і того і другого фактора одночасно. У цьому випадку забезпечується випромінювання тепер уже плоскими елементами оболонки всередину рідини і звукових хвиль з обумовленим ступенем аберації;

- зміна складу фізичних властивостей розділяючої рідини і матеріалу зовнішньої оболонки тунелю визначають необхідний ступінь аберації у вигляді співвідношення $\sin \alpha = \frac{c}{V}$;

- при забезпеченні великого хвильового розміру зовнішньої оболонки вважаємо правомочним надання елементарного відрізка її поверхні у вигляді пластини, що дозволяє мати можливість скористатися відомими співвідношеннями настання резонансу обстановки взаємодії акустичної хвилі і пластини у вигляді хвильового збігу і формування умови акустичної прозорості перепони, коли енергія ультразвукового променя буде практично без втрат (без дисипації) проходити в міжоболонкову рідину.

Висновки до розділу 4

Здійснені напівнатурні експериментальні дослідження макетів оборонного призначення дозволяють оцінити ефективність засобів маскування та обмеженої примітності за допомогою штучно формуємих *zone kaustikos*. Узагальнюючі висновки комплексного вирішення поставлених задач можна окреслити наступним чином:

1. Побудовані розрахункові моделі штучного формування буферних зон у вигляді *zone kaustikos* довели слушність пропонуємих технічних рішень для

розв'язання одночасно двох задач практичного використання апаратів спеціального призначення – задач маскування і обмеженої примітності апаратів в цілому, підвищення точності гіроскопічних сенсорів тактичної палубної авіації, засобів силової стабілізації баштових гармат танків, ступінь маскування субмарин від глибоководного бомбометання та деякі інші.

2. Експериментальні дослідження довели слушність запропонованих технічних рішень для потреб обмеженої примітності та повного маскування сухопутних вогневих засобів (танків), тактичної палубної та стратегічної бомбардувальної авіації з вертикальним стартом та субмарин від розвідувально-диверсійних засобів супротивника в зоні бойових дій.

ВИСНОВКИ

Проведені теоретичні і експериментальні дослідження дозволяють глибше розкрити природу виникнення резонансної ситуації в підвісі гіроскопа і узагальнити вивчаєме явище для зменшення похибок приладу в експлуатаційних умовах, з'ясувати природу пружної взаємодії проникаючого акустичного випромінювання з підвісом гіроскопа, окреслити особливості локального і глобального характеру підвісу, обрати ефективні засоби зменшення впливу проникаючого акустичного випромінювання на похибку поплавкового гіроскопа і ліквідувати технологічні ризики аеронавігації:

1. Сформульовані принципи побудови розрахункових моделей явища та окреслені особливості побудови наближених і точних розрахункових схем. Проведений детальний аналіз природи пружної взаємодії проникаючого акустичного випромінювання з поліагрегатною системою підвісу серійно випускаемого авіаційною промисловістю поплавкового гіроскопа класу ДУСУ2.

Розкритий зміст хвильового розміру оболонки корпусу поплавкового гіроскопа і окреслене його значення на ступінь аберації генеруємих в ньому звукових хвиль і їх вплив на формування зони каустики.

Розкрито механізм природного формування зони каустики на резонансному рівні хвильового співпадання.

Вперше експериментально розкритий зміст і динаміка розвитку означених аналізом розрахункових моделей плоскої каустики в площині шпангоута корпусу гіроскопа.

Експериментально виявлені потужні рушійні потоки рідинної складової підвісу гіроскопа у вигляді колової циркуляції та наявність висхідних теплових потоків з формуванням градієнта тепла.

2. Теоретично передбачена та експериментально доведена небезпека виникнення, за певних умов, в поліагрегатному підвісі гіроскопа резонансної ситуації – геометричний резонанс (хвильове співпадання) у вигляді кутів

співпадання сліду падаючої та згинної хвилі корпусу на частотах вище за граничну ($\theta_c = 21^\circ 07'$;) та сліду падаючої і колової хвилі на частотах нижче за граничну ($\theta_c = 3^\circ 41'$), рівності сліду кола шпангоута на площину паралельну площині фронту падаючої плоскої хвилі та колової хвилі, комбінований резонанс в підвісі гіроскопа за одночасної зміни варіативних параметрів наближеної і уточненої моделі (квазі “акустично прозорий” корпус приладу)

3. Розкритий ступінь впливу зони каустики на “зсув нуля” поплавкового гіроскопа і породжену ним додаткову похибку $\Delta\omega_{cp} = 0,231 \text{ град} \cdot \text{с}^{-1}$ в експлуатаційних умовах.

4. Пояснюється явище штучного формування в напівнатурних умовах буферної зони з метою ліквідації впливу на гіроскоп проникаючого акустичного випромінювання, експериментально підтверджується ступень доцільності обраного технічного рішення, яка відповідає десятикратному зменшенню додаткової похибки гіроскопа до значення $\Delta\omega_{cp} \approx 0,02473 \text{ град} \cdot \text{с}^{-1}$ замість $\Delta\omega_{cp} \approx 0,231 \text{ град} \cdot \text{с}^{-1}$.

5. Експериментально підтверджена можливість обернення зони каустики на користь, зокрема, для вирішення комплексних задач маскування і обмеженої примітності засобам ехолокації розвідувально-диверсійними підрозділами супротивника військових об’єктів в цілому – танки, палубна авіація, субмарини тощо.

6. Матеріали дисертаційної роботи знайшли застосування в розробках ДП НВК «Фотоприлад» на етапі проектування тривісної гіростабілізованої платформи для баштової гармати танка. Запропоновано засоби звукоізоляції гіроскопів, з яких окремі технічні рішення захищені Патентами України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Lighthill, M.J. On sound generated aerodynamically / – London: Part I, General theory, Proc. Soc., 221 A, 1951, – P. 564-587.
2. Lighthill, M.J. On sound generated aerodynamically / – London: Part II, Turbulence as a source of sound, Proc. Roy. Soc., A 222, 1954, – P. 1-32.
3. Даэр И. Колебания корпуса космического аппарата под действием шума ракетных двигателей / Случайные колебания под. ред. С. Крендела. – М.: Мир, 1967, – С. 192-211.
4. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах / – М.: Наука, 1973. – 344с.
5. Гусев В.П., Осинский А.И. Устройство для подавления шума А.С. № 8836652. / Бюл. № 21, 1981.
6. Фесенко С.В., Мельник В.М., Карачун В.В. Проникающее акустическое излучение как фактор ухудшение технических характеристик РН / XIV Міжнар. молод. наук.-практ. конф. «Людина і космос», 11-13 квітня 2012 р., Дніпропетровськ, Україна. – Дніпропетровськ: НЦАОМУ ім. О.М. Макарова. – 2012. – С. 30.
7. Карачун В.В. Колебания пористых пластин под действием акустических возмущений / – Прикл. механика. 1986. Т. 22, № 3. – С. 43-46.
8. Белый Н.Г. Исследование акустической выносливости натурных панелей тонкостенных оболочек / Акустическая выносливость: Тр. ЦАГИ. Вып. 1222. – М.: Изд-во ЦАГИ. 1970.
9. Фесенко С.В. Вплив ультразвукового випромінювання на металеву конструкцію / XIII Міжнар. наук.-техн. конф. «ABIA-2017», 19-21 квітня 2017 р., Київ, Україна. – К. НАУ. – 2017. – С. 27.117.
10. Фесенко С.В., Шибецький В.Ю. Точність позиціонування інерціальних приладів навігації у високочастотних акустичних полях / XIII Міжнар. наук.-техн. конф. «ABIA-2017», 19-21 квітня 2017 р., Київ, Україна. – К. НАУ. – 2017. – С. 12.69.

11. Мельник В.Н., Карачун В.В. Нелинейные колебания в полиагрегатном подвесе гироскопа: монография / Нац. техн. ун-т Украины “КПИ”. – Киев: “Корнейчук”. 2008. 104 с.: ил., табл. – Библиогр. – С. 80-82.
12. Композиционные материалы в ракетно-космическом аппарато-строении / Г.П. Гардымов, Е.В. Мешков, А.В. Пчелинцев [та ін.]: –СПб. Спец. Лит, 1999. – 271 с.
13. Сотовые конструкции космических аппаратов / М.Г. Добрушина, В.В. Кавун, Ю.А. Кореннов [та ін.]: Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов IV междунар. науч.-практ. конф. (Днепропетровск 1–3 июня 2011 г.). Укр. НИИ технологий машиностроения. – Днепропетровск. 2011. – С. 123–129.
14. Оптимальное проектирование композитных сотовых конструкций авиакосмической техники: моногр. / В.Е. Гайдачук, А.В. Кондратьев, В.В. Кириченко, В.И. Сливинский // – Х. Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». 2011. – 172 с.
15. Авиация: Энциклопедия / гл. ред. Г.П. Свищёв. – М.: Большая Российская энциклопедия. 1994. – 736 с.
16. Гудков А.И., Лешаков П.С. Внешние нагрузки и прочность летательных аппаратов / – М.: Машиностроение. 1968. – 470 с.
17. Выносливость авиационных конструкций при акустических нагрузках (по материалам иностранной печати 1962 – 1965 гг.) / Обзор ЦАГИ. № 218. 1967. – 75 с.
18. Фесенко С.В., Шибецкий В.Ю. Встановлення особливостей виникнення систематичної похибки вимірювань ДУСУ в полі дії ультразвукового випромінювання / ПРТК-2017: Десята Міжнар. наук.-практ. конф., 16-17 травня 2017 р., Київ, Україна. – К. НАУ. – 2017. – С. 61.
19. Кошляков В.Н. Задачи динамики твердого тела и прикладной теории гироскопов: Аналитические методы. / – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1985. – 288 с.

20. Павловський М.А. Теория гироскопов: Учебное пособие. / – К.: Вища школа, головное изд-во. 1986. – 303 с.
21. Одинцов А.А. Компенсационные гиротаксометры / – К.: Изд-во КПИ, 1970. – 170 с.
22. Бублик Г.Ф., Одинцов А.А., Павловский М.А. Об автоколебаниях гировертикалей и курсовых гироскопов с коррекцией от жидкостного маятникового переключателя (ЖМП). / Изв. вузов СССР. Приборостроение. 1968. №1. – С. 39-40
23. Самотокин Б.Б., Мелешко В.В., Степанковский Ю.В. Навигационные приборы и системы: Учебное пособие / – К.: Вища школа. 1986. – 344 с.
24. Безвесільна О.М., Подчашинський Ю.О. Алгоритмічні методи визначення лінійних прискорень у реальному часі / Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Автоматика і приладобудування. 2010. № 23. – С. 13-21.
25. Безвесільна О.М., Коваль А.В. Двоканальна авіаційна гравіметрична система для вимірювання аномалій прискорення сили ваги / Вісник ЖДТУ: Технічні науки. 2009. Т. 51. № 4. – С. 115-119.
26. Рыжков Л.М., Иванов С.В. О синтезе автоматических систем стабилизации / Механика гироскопических систем. 1997. Вып. 14. – С. 140-147.
27. Чиковани В.В., Янчук А.Н. Коррекция дрейфа кориолисового вибрационного гироскопа с металлическим цилиндрическим резонатором / «Гиротехнологии, навигация, управление движением и конструирование авиационно-космической техники»: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. (Киев, 21-23 апреля 2003 г.). – Киев, 2003. – С. 214-220.
28. Захарин Ф.М., Самойленко О.В., Карнаух Т.І. Методичні аспекти уніфікації інтегрованих інерціально-супутникових навігаційних систем для авіаційних об'єктів / Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. – К.: ДНДІА. 2012. Вип. 15. – С. 59-64.

29. Захарин Ф.М., Пономаренко С.О., Ковтун В.І. Сучасні тенденції розвитку інтегрованих інерціально-супутникових навігаційних систем літальних апаратів / Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. – К.: ДНДІА, 2013. Вип. 16. – С. 77-85.
30. Захарін Ф.М., Карнаух Т.І., Пономаренко С.О. Спосіб комплексної обробки інформації від датчиків курсо-швидкісної навігаційної системи і супутникової навігаційної системи літального апарату / Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації. – К.: ДНДІА, 2011. Вип. 4. – С. 65-72.
31. Гречка Г.П., Корольов В.М. Оцінка похибки визначення азимута самоорієнтовною БІНС при дії на неї випадкової хитавиці / Військово-технічний збірник Академії Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. 2014. Вип. 1 (10). – С.27-31
32. Шляхи застосування навігаційної апаратури при типових варіантах ведення бойових дій загальновійськовими підрозділами / П.П. Ткачук, В.М. Корольов, О.П. Красюк, В.Д. Макаревич // Військово-технічний збірник Академії Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. 2011. Вип. 2 (5). – С.115-119.
33. Корольов В.М. Перспективи та проблеми застосування навігаційних технологій у Сухопутних військах / Військово-технічний збірник Академії Сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного. 2011. Вип. 1 (4). – С.56-61.
34. Дидковский В.С., Павловский М.А., Карачун В.В. О динамике пластин / Вести КПИ. Сер. Приборостроение. – Киев. 1983. № 13. – С. 9-11.
35. Карачун В.В. О колебаниях пластин при акустическом нагружении / Прикл. Механика. – Киев. 1988. Т.24. № 11. – С. 84-91.
36. Карачун В.В., Дидковский В.С. О динамике пористой пластинки при переменном давлении. / Вести. КПИ, Приборостроение. – Киев. 1984. № 14. – С. 30-33.

37. Карачун В.В. Об особенностях акустического нагружения пластин конечных размеров / Проблемы прочности. 1990. №10. – С. 93-96.
38. Карачун В.В., Мартыненко В.С. О перемещении абсолютно твердой оболочки под воздействием внешней акустической волны давления / ДАН УССР. Сер. А. 1991. №3. – С. 42-45.
39. Карачун В.В. Об одномерных изгибных колебаниях двухслойной пластины в поле избыточного давления / Вести КПИ, Приборостроение. – Киев. 1986. № 16. – С. 8-9.
40. Карачун В.В., Лозовик В.Г. Напряженно-деформированное состояние поверхности круговой цилиндрической оболочки под действием акустической волны / Проблемы прочности. 1997. №3. – С. 139-144.
41. Многомерные задачи нестационарной упругости подвеса поплавкового гироскопа / В.В. Карачун, В.Г. Лозовик, Е.Р. Потапова, В.Н. Мельник // Под. ред. В.В. Карачуна. – К.: «Корнейчук». 2000. – 128 с.
42. Карачун В.В., Кубрак Н.А. Дротяні елементи приладів в акустичному середовищі / – К.: «Корнейчук». 2001. – 160 с.
43. Карачун В.В. Прохождение волны избыточного давления через многофазную механическую структуру / Космічна наука і технологія. 1996. Т.2. №3-4. – С. 58-61.
44. Вавилов В.А., Перетц В.Б., Бараев С.В. О звукоизоляции оболочек / Институт охраны труда ВЦСПС. Вып. 7, 1968. – С. 84 – 87.
45. Reissner H. Der senkrecht und schräge Durchtritt einer in einen flüssiger Medium erzeugten ebenen Dilatations – (Longitudinal) – Welle durch eine in diesen Medium befindliche planarallelefeste Platte / Helv. Phys. Acta. 1938. Т. 11.
46. Schoch A. Der Schalldurchgang durch Platten / Acustica. 1952. Т. 2.
47. Лейбензон Л.С. Курс теории упругости: учеб. для вузов / М.: Гостехтеоретиздат. 1947. – 453 с.
48. Тимошенко С.П., Янг Д.Х., Уивер У. Колебания в инженерном деле / пер. с англ. С.П. Тимошенко. – М.: Машиностроение. 1985. – 472 с.

49. Вавилов В.А., Перетц В.Б., Бараев С.В. О звукоизоляции оболочек / Институт охраны труда ВЦСПС. Вып. 7. 1968. – С. 84–87.
50. Cremer L. Theorie der Luftschalldämmung zylindrischer Schaleu / *Acustica*. № 5. 1955.
51. Heckl M. Exerimentelle Untersuchungen zur Schalldämmungen von Zylindern/ *Acustica*. Vol. 8. № 1. 1958.
52. White P.H. Sound transmission through a finite, closed, eilinderical shell / *JASA*. Vol.40. № 5. 1966.
53. Власов В.З. Основные дифференциальные уравнения общей теории оболочек / Прикл. матем. и механика. Т. 8. № 2. 1944. – С. 72-76.
54. Власов В.З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике: моногр./ – М.: Гостехтеоретиздат. 1949. – 372 с.
55. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек: моногр./ – Л. Судпромгиз. 1951. – 437 с.
56. Дидковский В.С., Карачун В.В., Заборов В.И. Проектирование ограждающих конструкций с оптимальными звуко- и виброизоляционными свойствами: моногр./ – К.: Будивэльник. 1991. – 120 с.
57. Boiko G.V., Karachun V.V., Fesenko S.V. Noise-protective case to fight the penetrating acoustic radiation / THE SEVENTH WORLD CONGRESS “AVIATION IN THE XXI-st CENTURY” – Kyiv. NAU. – 2016. – P. 3.6.20.
58. Лейзер И.Г. Исследование звукоизоляции ограждений на моделях. Вопросы звукоизоляции в архитектурной акустике / Под. ред. В.Н. Никольского. – М.: Госстройиздат. 1959. – С. 29-46.
59. Karachun V.V., Mel’nick V.M., Fesenko S.V. Reduction of technological risks of flight operation by artificial formation of the buffer zone to penetrating acoustic radiation / «Technology audit and production reserves». – 2017. – №4/1 (36). – P. 19-24.

60. Шибецкий В.Ю., Фесенко С.В. Формирование энергетической активности высокочастотными акустическими полями / «Міжнародний науковий журнал». – 2016. – №11 (21). – Т.1. – С. 108-110.
61. Transmission of a spherical sound wave through a single-leaf wall: Mass law for spherical wave incidence/ Yairia M., Kogaa T., Takebayashia K., Sakagami K.// Applied Acoustics. Vol.75. Jan. 2014. – P. 67-71 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X13001497> (дата звернення: 16.05.2017)
62. Heat transfer by shock-wave/boundary layer interaction on a flat surface with a mounted cylinder/ Man Sun Yua, Jiwoon Songa, Ju Chan Baeb, Hyung Hee Choa// International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol.55. Feb.2012. – P.1764-1772 URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931011006703> (дата звернення: 15.05.2017)
63. A facile method to realize perfectly matched layers for elastic waves / Zheng Changa, Dengke Guoa, Xi-Qiao Fengb, Gengkai Hu// Wave Motion. Vol.51. Nov.2014. – P.1170-1178. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165212514000869> (дата звернення: 16.05.2017)
64. Wave propagation across double-walled laminated composite cylindrical shells along with air-gap using three-dimensional theory/ R.Talebitooti A.M.Choudari Khameneh// Composite Structures. Vol.165. Apr. 2017. URL: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382231631_3010 (дата звернення: 16.05.2017)
65. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики: моногр./ – Л.: Судостроение. 1972. – 352 с.
66. Заборов, В.И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций: моногр./ – М.: Изд-во литературы по строительству. 1969. – 185 с.
67. Гладкий В. Ф. Динамика конструкции летательного аппарата: моногр. / – М.: Наука. 1969. – 496 с.

68. Карачун В.В., Мельник В.М., Фесенко С.В. Дифракція звукових хвиль на металевому кільці / «Технологічний аудит та резерви виробництва». – 2016. – №6/2 (32). – С. 4-9.
69. Мельник В.М., Карачун В.В., Фесенко С.В. Штучне формування зон активної турбулентності звуковими хвилями / «Міжнародний науковий журнал». – 2016. – №11 (21). – Т.1. – С. 85-89.
70. Karachun V.V., Ladogubets N.V., Fesenko S.V. The nature of resonance features in the suspension of the gyroscope due to diffraction effects / THE SEVENTH WORLD CONGRESS “AVIATION IN THE XXI-st CENTURY”, Kyiv, Ukraine. – Kyiv. NAU. – 2016. – P. 3.6.16.
71. Фесенко С. В., Шибецький В. Ю. Дослідження особливостей поведінки циліндричної оболонки в ультразвуковому полі/ Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси. – Київ. 2016. № 3. – С. 61.
72. Лепоринская Л. П. Выносливость авиационных конструкций при акустических нагрузках / Выносливость авиационных конструкций при акустических нагрузках. 1967. № 218. – С. 317–325.
73. Вяльцев В. В., Хоргуани В. Г. Мощная низкочастотная звуковая сирена / Акустический журнал. 1961. Вып. 3. № 7. – С. 377–378.
74. Белый Н. Г., Пачандо А. В. Об акустическом нагружении фюзеляжа самолета ИЛ-18 и выносливости элементов его обшивки / Прочность и долговечность авиационных конструкций. 1965. Вып. 11. – С. 4–57.
75. Фокс Вильямс, Д. Е. Шум высокоскоростных ракет: сб. науч. тр. / под ред. С. Крендела. Случайные колебания. – М.: Мир. 1967. – С. 45–49.
76. Гринченко В. Т., Мелешко В. В. Гармонические колебания и волны в упругих телах: моногр. / – К.: Наукова думка. 1981. – 283 с.
77. Валеев К. Г., Квитка В. Е. Определение напряженного состояния плоской панели в акустическом поле выхлопной струи/ Прикладная механика. 1970. Vol. VI. № 4. – С. 39–43.

78. Павловский М. А., Петренко В. Е. Об автокомпенсации погрешностей гиротаксметров при угловой вибрации основания / Доклады АН УССР. Серия А. 1977. № 8. – С. 81–84.
79. Application of an Inertial Navigation System to the Quad-rotor UAV using MEMS Sensors / T. T. Nwe et al. // Engineering and Technology. 2008. Vol. 42. – P. 578–582.
80. Мельник В.М., Карачун В.В., Фесенко С.В. Локальная аттестация поплавкового гироскопа на функциональную способность / XI «Приладобудування: стан і перспективи». – Київ «КПІ». – 2012. – С. 39.
81. Le Manh Hung, V. Indoor Navigation System for Handheld Devices: monograph / – Worcester. 2009. – 198 p.
82. Карачун В.В., Мельник В.М., Фесенко С.В. Особливості структури похибок двоступеневого гіроскопа при наявному акустичному імпедансі / «Приладобудування: стан і перспективи» – Київ, «КПІ». – 2012. – С. 38.
83. А.с. СССР № 1779129, МПК G01C19/20. Поплавковый гироскоп / опубл. 1996.
84. Данилин В.П.. Гироскопические приборы: уч. пособие / – М.: Высш. шк. 1965. – 539 с.
85. Ригли У., Холлистер У., Денхард У. Теория, проектирование и испытание гироскопов: пер. с англ. / – М.: Мир. 1972. – 416 с.
86. Карачун В.В., Мельник В.М., Фесенко С.В. Забезпечення скритної дислокації танка у фортифікаційних спорудах відкритого типу / Scientific Journal «ScienceRise». – 2017. – №4 (33). – С. 31-36.
87. Карачун В.В., Мельник В.М. Задачі супроводу та маскуванню рухомих об'єктів: моногр./ НТУУ "КПІ". – Київ: "Корнійчук". 2011. – 264 с.
88. Ракетный танк Pereh / URL: <http://armyman.info/bronetehnika/tanki/46634-izrailskiy-raketnyy-tank-pereh.htm> (дата звернення: 17.04.2017).
89. Основной боевой танк M60T Sabra (Израиль/Турция) / URL: <http://armyman.info/bronetehnika/tanki/46538-osnovnoy-boevoy-tank-m60t-sabra-izrailturciya.html> (дата звернення: 18.04.2017)

90. Израильский ракетный танк Pereh / URL: <https://topwar.ru/90298-izrailskiy-raketnyy-tank-pereh.html> (дата звернения: 17.04.2017)
91. Броне Сайт / URL: <http://armor.kiev.ua/> (дата звернения: 19.04.2017)
92. Combat Vehicle Modernization Strategy/ URL: <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ground/cvms.htm> (дата звернения: 17.04.2017)
93. IDEX 2017 – Military Expo at the Combat Edge / URL: http://defense-update.com/20170219_idex2017.html (дата звернения: 18.04.2017)
94. Ученые создали простой мимикрирующий камуфляж / URL: http://zoom.cnews.ru/rnd/article/item/uchenye_sozdali_prostoj_mimikriruyus_hchij (дата звернения: 19.04.2017)
95. Melnick, V., Karachun V. Additional errors autonomous azimuth positioning of combat vehicles / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. № 2/7 (56). – Р. 4-7.
96. Гиперзвуковая война пугает неопределенностью / URL: http://zoom.cnews.ru/rnd/article/item/giperzvukovaya_vojna_pugaet_neopredelennostyu/print/ (дата звернения: 05.06.2017)
97. Общие положения о маскировке самолетов / URL: <http://armedman.ru/stati/obshhie-polozheniya-o-maskirovke-samoletov.html/>. (дата звернения: 06.06.2017)
98. Маскировка от радиолокационных средств разведки / URL: <http://bukvi.ru/bgd/osnovy-maskirovki-ot-razvedki-protivnika.html/> (дата звернения: 05.06.2017)
99. Гордеев Н. П. Маскировка в боевых действиях флота / – М. 1971. – 160 с.
100. Зеркальный самолет инженера И.И. Варшавского. Угол отражения / URL: <http://alternathistory.com/zerkalnyi-samolet-inzhenera-ii-varshavskogo-ugol-otrazheniya/> (дата звернения: 07.06.2017)
101. Королёв А.Ю., Королёва АА., Яковлев А.Д. Маскировка вооружения, техники и объектов: уч. Пособие / – СПб: Университет ИТМО. 2015. – 155 с.

102. Технология Стелс / URL: <http://avia.pro/blog/tehnologiya-stels-korotko-i-yasno/> (дата звернення: 05.06.2017)
103. Заводсков А. С., Коротченко Р. А. Крылатые тени. Методы защиты самолета от радиолокационного обнаружения / Юный ученый. 2016. №3. – С. 132-136 // URL: <http://yun.moluch.ru/archive/6/474/> (дата звернення: 06.06.2017)
104. 50 лет без дозаправки и шума: американцы совершенствуют подлодки / URL: http://zoom.cnews.ru/rnd/news/line/50_let_bez_dozapravki_i_shuma_amerikancy_overshenstvuyut_podlodki (дата звернення 10.05.2017)
105. Нужен ли военным корабль-подлодка? / URL: http://zoom.cnews.ru/rnd/news/line/nuzhen_li_voennym_korablpodlodka (дата звернення: 11.05.2017)
106. Аристов, А. П. Демаскирующие признаки, их устранение и ослабление в морских операциях. / Военная мысль № 7/1986. – С. 22-30. // URL: <http://militaryarticle.ru/voennaya-mysl/1986-vm/8121-demaskirujushhie-priznaki-ih-ustranenie-i> (дата звернення: 10.05.2017)
107. Подводные лодки и корабли закрыли звуковым барьером / URL: <http://izvestia.ru/news/674389> (дата звернення: 12.05.2017)
108. Патент RU № 2564935, МПК В63G8/34. Способ маскировки следа подводного аппарата / Бардаков Р. Н. (RU), Чаплина Т. О. (RU); опубл. 10.09.2015 г.
109. Патент RU 2022872, МПК В63G8/34. Самоходный имитатор подводной лодки / Павликов С. Н.; заявл. 13.11.1991. опубл. 15.11.1994 г.
110. Патент RU 2137673, МПК В63G8/34, В63G 13/02; F41H 3/00. Морской боевой подвижный комплекс. / Таланов Б.П.; № 97122056/28, заявл. 22.12.1997, опубл. 20.09.1999 г.
111. Патент RU 2507108, МПК В63G13/02, В63G 8/34, F41H 3/00. Способ маскировки подводной лодки / Небольсин В. А.; заявл. 07.11.2012, опубл. 20.02.2014 г.

112. Александров Ю. И., Гусев А. Н. Боевые корабли мира на рубеже XX-XXI веков. Часть I. Подводные лодки: справочник / – Санкт-Петербург, "Галея-Принт. 2000. – 302 с.

ДОДАТКИ

Додаток А

ДЕРЖАВНИЙ КОНЦЕРН
«УКРОБОРОНПРОМ»



STATE CONCERN
«UKROBORONPROM»

ДЕРЖАВНЕ ПІДПРИЄМСТВО
НАУКОВО-ВИРОБНИЧИЙ
КОМПЛЕКС «ФОТОПРИЛАД»

STATE ENTERPRISE
RESEARCH AND PRODUCTION
COMPLEX «FOTOPRYLAD»

вул. Б. Вишневецького, 85, м. Черкаси, 18000
т/ф (0472) 47-45-68; т/ф (0472) 45-12-75
Tel. +38 (0472) 36-03-08
E – mail: sokol@photopribor.ck.ua

85, B. Vyshnevetsky St. Cherkasy, 18000
Tel./Fax. +38 (0472) 45-12-75; 37-45-31
Tel. +38 (0472) 36-03-08
E – mail: sokol@photopribor.ck.ua



ЗАТВЕРДЖУЮ

Заст. генерального директора з науки-
головний конструктор,
доктор технічних наук
В.І.Гордієнко

АКТ

**про використання результатів дисертації Фесенка С.В.
«Вплив проникаючого акустичного випромінювання на поліагрегатний
підвіс гіроскопа і похибки вимірювань на резонансному рівні»**

Дійсним підтверджується, що матеріали дисертаційної роботи Фесенка С.В. «Вплив проникаючого акустичного випромінювання на поліагрегатний підвіс гіроскопа і похибки вимірювань на резонансному рівні» стосовно зменшення похибок сенсорів тривісного силового гіроскопічного стабілізатора баштової гармати танка, формуванням буферної зони від впливу ударних звукових хвиль на етапі вогневих випробувань дають задовільні результати зменшення додаткових похибок гіроскопа до 10 разів, тобто до величин окреслених паспортом на виріб.

Лабораторні випробування інерціальних сенсорів гіростабілізованої платформи проводилися в рамках випробувально-конструкторських досліджень новітньої вогневої техніки з системою силової стабілізації гармати за сигналами інерціальних сенсорів класу ДУСУ2-30В. Додаткова похибка від дії ударної звукової хвилі без запобіжних засобів звукоізоляції становила $\Delta\omega_{\text{ср}} \approx 0,231$ град с^{-1} . Штучне формування буферної зони у вигляді циліндричної каустики в рідинній частині модульного варіанту запобіжної системи зменшила похибку інерціальних сенсорів приблизно в 8 разів, тобто до значення $\Delta\omega_{\text{ср}} \approx 0,029$ град с^{-1} .

Результати досліджень, виконаних в процесі роботи над дисертацією, представляють цінність і можуть бути рекомендовані для впровадження в різних об'єктах бронетехніки.

Акт не може слугувати підставою для фінансових розрахунків між сторонами.

Начальник сектору розробки гіроскопічних приладів

О.Г.Голуб

Додаток Б-1

Програма обчислень звукопроникності елементів корпусу поплавкового гіроскопа класу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя.

$$\tau_{\theta} = \frac{1}{\left(1 + \eta \frac{c_u^4}{c_s^4} \cdot \frac{m_{\Pi} \omega}{2 \rho_s c_s} \sin^4 \theta \cos \theta\right)^2 + \left(1 - \frac{c_u^4}{c_s^4} \sin^4 \theta\right)^2 \left(\frac{\omega m_{\Pi}}{2 \rho_s c_s} \cos \theta\right)^2},$$

$$\begin{array}{llll} f := 42 \cdot 10^3 & c_v := 331 & \eta := 1 & mP := 5,4 \\ \omega := 2 \cdot \pi \cdot f & \rho_v := 1.23 & \theta := 0..85 & \end{array}$$

$$\tau := \left[\begin{array}{l} c_v \leftarrow 331 \\ mP \leftarrow 5.4 \\ \eta \leftarrow 1 \\ E \leftarrow 74 \cdot 10^7 \\ \delta \leftarrow 1 \cdot 10^{-3} \\ \sigma \leftarrow 0.34 \\ \rho_v \leftarrow 1.23 \\ f \leftarrow 42 \cdot 10^3 \\ \omega \leftarrow 2 \cdot \pi \cdot f \\ \theta_{\min} \leftarrow 0 \\ \theta_{\max} \leftarrow 85 \\ \text{for } i \in 0.. \theta_{\max} \\ \quad \theta_i \leftarrow \theta_{\min} + i \cdot \frac{\pi}{180} \\ \quad c_i \leftarrow \left[\frac{2 \cdot E \cdot \delta^3 \cdot \omega^2}{3 \cdot mP \cdot (1 - \sigma^2)} \right]^{\frac{1}{4}} \\ \quad \tau_i \leftarrow \frac{1}{\left[1 + \eta \cdot \frac{(c_i)^4}{c_v^4} \cdot \frac{mP \cdot \omega}{2 \cdot \rho_v \cdot c_v} \cdot (\sin(\theta_i))^4 \cdot \cos(\theta_i) \right]^2 + \left[1 - \frac{(c_i)^4}{c_v^4} \cdot (\sin(\theta_i))^4 \right]^2 \left(\frac{\omega \cdot mP}{2 \cdot \rho_v \cdot c_v} \cos(\theta_i) \right)^2} \\ \tau \end{array} \right]$$

Додаток Б-2

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя за частоти акустичного випромінювання

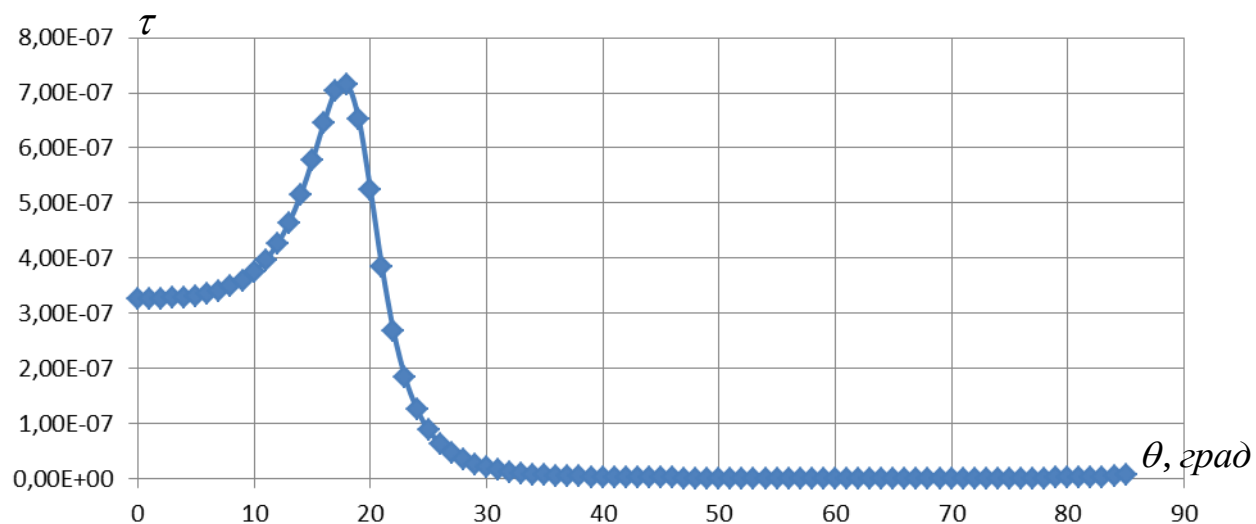
$$f = 35 \cdot 10^3 \text{ Гц}.$$

дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$				$f = 35 \cdot 10^3 \text{ Гц}$	
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	$4,706 \cdot 10^{-7}$	30	$6,740 \cdot 10^{-8}$	60	$1,796 \cdot 10^{-9}$
1	$4,708 \cdot 10^{-7}$	31	$5,221 \cdot 10^{-8}$	61	$1,762 \cdot 10^{-9}$
2	$4,713 \cdot 10^{-7}$	32	$4,104 \cdot 10^{-8}$	62	$1,740 \cdot 10^{-9}$
3	$4,722 \cdot 10^{-7}$	33	$3,271 \cdot 10^{-8}$	63	$1,727 \cdot 10^{-9}$
4	$4,739 \cdot 10^{-7}$	34	$2,641 \cdot 10^{-8}$	64	$1,726 \cdot 10^{-9}$
5	$4,765 \cdot 10^{-7}$	35	$2,158 \cdot 10^{-8}$	65	$1,735 \cdot 10^{-9}$
6	$4,806 \cdot 10^{-7}$	36	$1,783 \cdot 10^{-8}$	66	$1,756 \cdot 10^{-9}$
7	$4,866 \cdot 10^{-7}$	37	$1,488 \cdot 10^{-8}$	67	$1,789 \cdot 10^{-9}$
8	$4,951 \cdot 10^{-7}$	38	$1,254 \cdot 10^{-8}$	68	$1,835 \cdot 10^{-9}$
9	$5,070 \cdot 10^{-7}$	39	$1,067 \cdot 10^{-8}$	69	$1,896 \cdot 10^{-9}$
10	$5,233 \cdot 10^{-7}$	40	$9,159 \cdot 10^{-9}$	70	$1,974 \cdot 10^{-9}$
11	$5,451 \cdot 10^{-7}$	41	$7,926 \cdot 10^{-9}$	71	$2,072 \cdot 10^{-9}$
12	$5,741 \cdot 10^{-7}$	42	$6,913 \cdot 10^{-9}$	72	$2,193 \cdot 10^{-9}$
13	$6,121 \cdot 10^{-7}$	43	$6,076 \cdot 10^{-9}$	73	$2,343 \cdot 10^{-9}$
14	$6,613 \cdot 10^{-7}$	44	$5,379 \cdot 10^{-9}$	74	$2,528 \cdot 10^{-9}$
15	$7,240 \cdot 10^{-7}$	45	$4,795 \cdot 10^{-9}$	75	$2,757 \cdot 10^{-9}$
16	$8,014 \cdot 10^{-7}$	46	$4,304 \cdot 10^{-9}$	76	$3,042 \cdot 10^{-9}$
17	$8,912 \cdot 10^{-7}$	47	$3,889 \cdot 10^{-9}$	77	$3,401 \cdot 10^{-9}$
18	$9,821 \cdot 10^{-7}$	48	$3,536 \cdot 10^{-9}$	78	$3,858 \cdot 10^{-9}$
19	$1,047 \cdot 10^{-6}$	49	$3,236 \cdot 10^{-9}$	79	$4,451 \cdot 10^{-9}$
20	$1,044 \cdot 10^{-6}$	50	$2,979 \cdot 10^{-9}$	80	$5,235 \cdot 10^{-9}$
21	$9,474 \cdot 10^{-7}$	51	$2,759 \cdot 10^{-9}$	81	$6,299 \cdot 10^{-9}$
22	$7,772 \cdot 10^{-7}$	52	$2,571 \cdot 10^{-9}$	82	$7,792 \cdot 10^{-9}$
23	$5,900 \cdot 10^{-7}$	53	$2,409 \cdot 10^{-9}$	83	$9,975 \cdot 10^{-9}$
24	$4,287 \cdot 10^{-7}$	54	$2,271 \cdot 10^{-9}$	84	$1,334 \cdot 10^{-8}$
25	$3,068 \cdot 10^{-7}$	55	$2,153 \cdot 10^{-9}$	85	$1,893 \cdot 10^{-8}$
26	$2,202 \cdot 10^{-7}$	56	$2,053 \cdot 10^{-9}$		
27	$1,598 \cdot 10^{-7}$	57	$1,968 \cdot 10^{-9}$		
28	$1,179 \cdot 10^{-7}$	58	$1,898 \cdot 10^{-9}$		
29	$8,839 \cdot 10^{-8}$	59	$1,841 \cdot 10^{-9}$		

Додаток Б-2

(продовження: Залежність звукопроникності τ корпусу ДУСУ2 від кута падіння звукового променя θ за частоти акустичного випромінювання

$$f = 35 \cdot 10^3 \text{ Гц})$$



Додаток Б-3

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя за частоти акустичного випромінювання

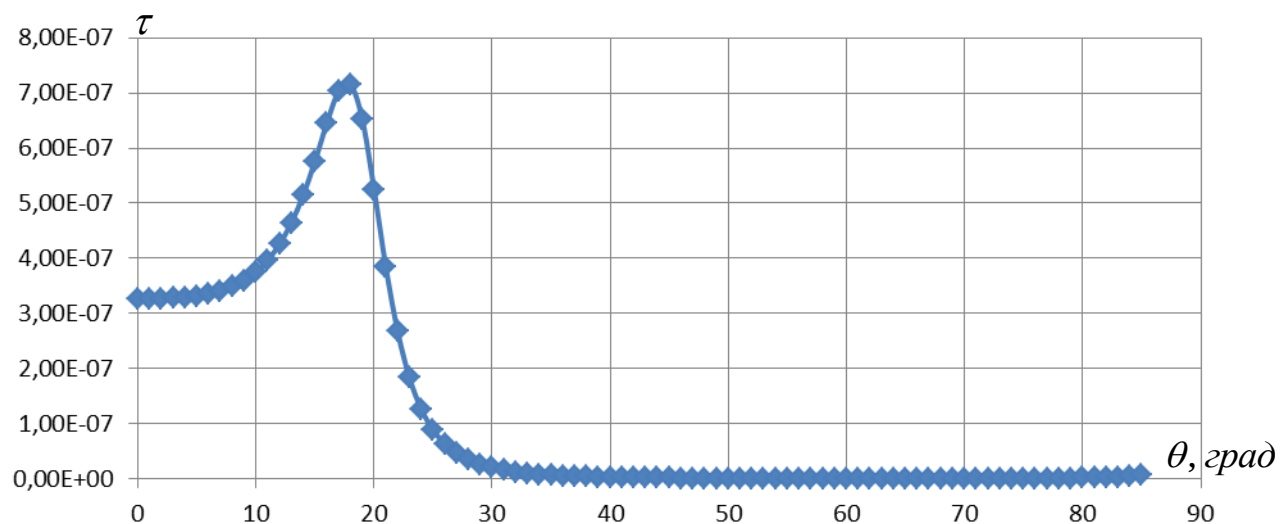
$$f = 36 \cdot 10^3 \text{ Гц}.$$

дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$				$f = 36 \cdot 10^3 \text{ Гц}$	
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	$4,449 \cdot 10^{-7}$	30	$5,585 \cdot 10^{-8}$	60	$1,513 \cdot 10^{-9}$
1	$4,450 \cdot 10^{-7}$	31	$4,333 \cdot 10^{-8}$	61	$1,485 \cdot 10^{-9}$
2	$4,455 \cdot 10^{-7}$	32	$3,412 \cdot 10^{-8}$	62	$1,466 \cdot 10^{-9}$
3	$4,464 \cdot 10^{-7}$	33	$2,723 \cdot 10^{-8}$	63	$1,456 \cdot 10^{-9}$
4	$4,480 \cdot 10^{-7}$	34	$2,202 \cdot 10^{-8}$	64	$1,455 \cdot 10^{-9}$
5	$4,505 \cdot 10^{-7}$	35	$1,801 \cdot 10^{-8}$	65	$1,463 \cdot 10^{-9}$
6	$4,545 \cdot 10^{-7}$	36	$1,489 \cdot 10^{-8}$	66	$1,480 \cdot 10^{-9}$
7	$4,604 \cdot 10^{-7}$	37	$1,244 \cdot 10^{-8}$	67	$1,508 \cdot 10^{-9}$
8	$4,688 \cdot 10^{-7}$	38	$1,050 \cdot 10^{-8}$	68	$1,547 \cdot 10^{-9}$
9	$4,806 \cdot 10^{-7}$	39	$8,938 \cdot 10^{-9}$	69	$1,598 \cdot 10^{-9}$
10	$4,968 \cdot 10^{-7}$	40	$7,676 \cdot 10^{-9}$	70	$1,664 \cdot 10^{-9}$
11	$5,186 \cdot 10^{-7}$	41	$6,646 \cdot 10^{-9}$	71	$1,747 \cdot 10^{-9}$
12	$5,475 \cdot 10^{-7}$	42	$5,800 \cdot 10^{-9}$	72	$1,849 \cdot 10^{-9}$
13	$5,855 \cdot 10^{-7}$	43	$5,100 \cdot 10^{-9}$	73	$1,976 \cdot 10^{-9}$
14	$6,348 \cdot 10^{-7}$	44	$4,517 \cdot 10^{-9}$	74	$2,132 \cdot 10^{-9}$
15	$6,976 \cdot 10^{-7}$	45	$4,028 \cdot 10^{-9}$	75	$2,325 \cdot 10^{-9}$
16	$7,746 \cdot 10^{-7}$	46	$3,617 \cdot 10^{-9}$	76	$2,565 \cdot 10^{-9}$
17	$8,621 \cdot 10^{-7}$	47	$3,269 \cdot 10^{-9}$	77	$2,868 \cdot 10^{-9}$
18	$9,456 \cdot 10^{-7}$	48	$2,974 \cdot 10^{-9}$	78	$3,253 \cdot 10^{-9}$
19	$9,937 \cdot 10^{-7}$	49	$2,722 \cdot 10^{-9}$	79	$3,753 \cdot 10^{-9}$
20	$9,658 \cdot 10^{-7}$	50	$2,506 \cdot 10^{-9}$	80	$4,415 \cdot 10^{-9}$
21	$8,469 \cdot 10^{-7}$	51	$2,322 \cdot 10^{-9}$	81	$5,312 \cdot 10^{-9}$
22	$6,726 \cdot 10^{-7}$	52	$2,164 \cdot 10^{-9}$	82	$6,572 \cdot 10^{-9}$
23	$4,985 \cdot 10^{-7}$	53	$2,028 \cdot 10^{-9}$	83	$8,412 \cdot 10^{-9}$
24	$3,572 \cdot 10^{-7}$	54	$1,912 \cdot 10^{-9}$	84	$1,125 \cdot 10^{-8}$
25	$2,539 \cdot 10^{-7}$	55	$1,813 \cdot 10^{-9}$	85	$1,597 \cdot 10^{-8}$
26	$1,817 \cdot 10^{-7}$	56	$1,729 \cdot 10^{-9}$		
27	$1,319 \cdot 10^{-7}$	57	$1,658 \cdot 10^{-9}$		
28	$9,737 \cdot 10^{-8}$	58	$1,599 \cdot 10^{-9}$		
29	$7,313 \cdot 10^{-8}$	59	$1,551 \cdot 10^{-9}$		

Додаток Б-3

(продовження: Залежність звукопроникності τ корпусу ДУСУ2 від кута падіння звукового променя θ за частоти акустичного випромінювання

$$f = 36 \cdot 10^3 \text{ Гц})$$



Додаток Б-4

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя за частоти акустичного випромінювання

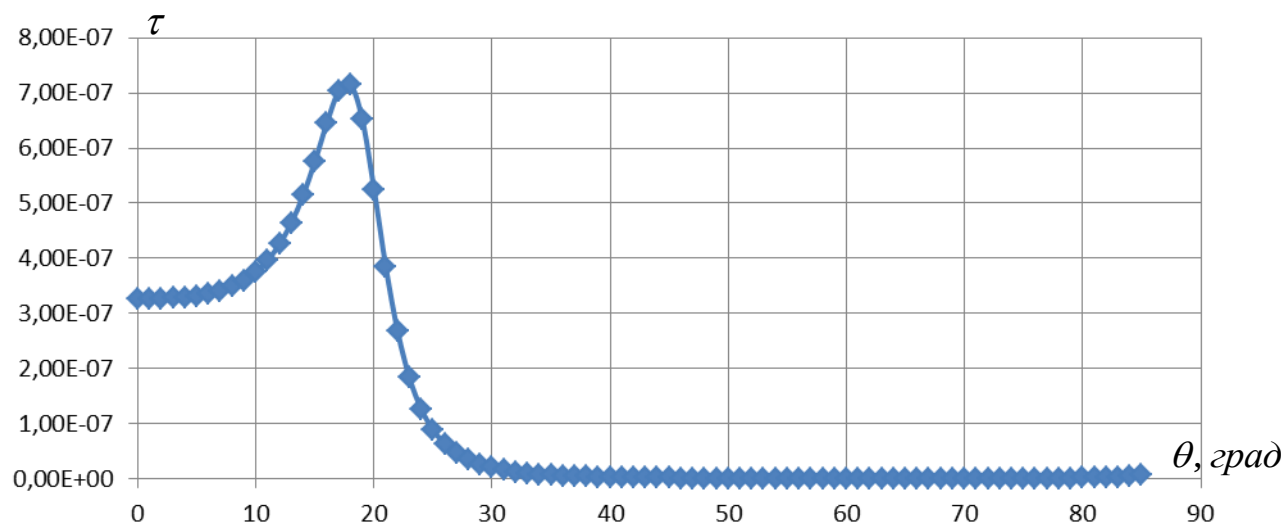
$$f = 37 \cdot 10^3 \text{ Гц}.$$

дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$				$f = 37 \cdot 10^3 \text{ Гц}$	
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	$4,211 \cdot 10^{-7}$	30	$4,655 \cdot 10^{-8}$	60	$1,281 \cdot 10^{-9}$
1	$4,213 \cdot 10^{-7}$	31	$3,618 \cdot 10^{-8}$	61	$1,257 \cdot 10^{-9}$
2	$4,217 \cdot 10^{-7}$	32	$2,853 \cdot 10^{-8}$	62	$1,241 \cdot 10^{-9}$
3	$4,226 \cdot 10^{-7}$	33	$2,280 \cdot 10^{-8}$	63	$1,233 \cdot 10^{-9}$
4	$4,241 \cdot 10^{-7}$	34	$1,846 \cdot 10^{-8}$	64	$1,232 \cdot 10^{-9}$
5	$4,266 \cdot 10^{-7}$	35	$1,511 \cdot 10^{-8}$	65	$1,239 \cdot 10^{-9}$
6	$4,305 \cdot 10^{-7}$	36	$1,251 \cdot 10^{-8}$	66	$1,253 \cdot 10^{-9}$
7	$4,363 \cdot 10^{-7}$	37	$1,046 \cdot 10^{-8}$	67	$1,277 \cdot 10^{-9}$
8	$4,447 \cdot 10^{-7}$	38	$8,833 \cdot 10^{-9}$	68	$1,310 \cdot 10^{-9}$
9	$4,564 \cdot 10^{-7}$	39	$7,526 \cdot 10^{-9}$	69	$1,354 \cdot 10^{-9}$
10	$4,724 \cdot 10^{-7}$	40	$6,467 \cdot 10^{-9}$	70	$1,410 \cdot 10^{-9}$
11	$4,941 \cdot 10^{-7}$	41	$5,602 \cdot 10^{-9}$	71	$1,480 \cdot 10^{-9}$
12	$5,230 \cdot 10^{-7}$	42	$4,892 \cdot 10^{-9}$	72	$1,567 \cdot 10^{-9}$
13	$5,611 \cdot 10^{-7}$	43	$4,303 \cdot 10^{-9}$	73	$1,674 \cdot 10^{-9}$
14	$6,106 \cdot 10^{-7}$	44	$3,812 \cdot 10^{-9}$	74	$1,806 \cdot 10^{-9}$
15	$6,734 \cdot 10^{-7}$	45	$3,401 \cdot 10^{-9}$	75	$1,970 \cdot 10^{-9}$
16	$7,498 \cdot 10^{-7}$	46	$3,055 \cdot 10^{-9}$	76	$2,173 \cdot 10^{-9}$
17	$8,343 \cdot 10^{-7}$	47	$2,762 \cdot 10^{-9}$	77	$2,430 \cdot 10^{-9}$
18	$9,089 \cdot 10^{-7}$	48	$2,513 \cdot 10^{-9}$	78	$2,757 \cdot 10^{-9}$
19	$9,390 \cdot 10^{-7}$	49	$2,301 \cdot 10^{-9}$	79	$3,180 \cdot 10^{-9}$
20	$8,869 \cdot 10^{-7}$	50	$2,119 \cdot 10^{-9}$	80	$3,741 \cdot 10^{-9}$
21	$7,515 \cdot 10^{-7}$	51	$1,963 \cdot 10^{-9}$	81	$4,501 \cdot 10^{-9}$
22	$5,793 \cdot 10^{-7}$	52	$1,830 \cdot 10^{-9}$	82	$5,568 \cdot 10^{-9}$
23	$4,208 \cdot 10^{-7}$	53	$1,716 \cdot 10^{-9}$	83	$7,128 \cdot 10^{-9}$
24	$2,981 \cdot 10^{-7}$	54	$1,618 \cdot 10^{-9}$	84	$9,535 \cdot 10^{-9}$
25	$2,109 \cdot 10^{-7}$	55	$1,534 \cdot 10^{-9}$	85	$1,353 \cdot 10^{-8}$
26	$1,507 \cdot 10^{-7}$	56	$1,463 \cdot 10^{-9}$		
27	$1,095 \cdot 10^{-7}$	57	$1,403 \cdot 10^{-9}$		
28	$8,090 \cdot 10^{-8}$	58	$1,353 \cdot 10^{-9}$		
29	$6,085 \cdot 10^{-8}$	59	$1,313 \cdot 10^{-9}$		

Додаток Б-4

(продовження: Залежність звукопроникності τ корпусу ДУСУ2 від кута падіння звукового променя θ за частоти акустичного випромінювання

$$f = 37 \cdot 10^3 \text{ Гц})$$



Додаток Б-5

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя за частоти акустичного випромінювання

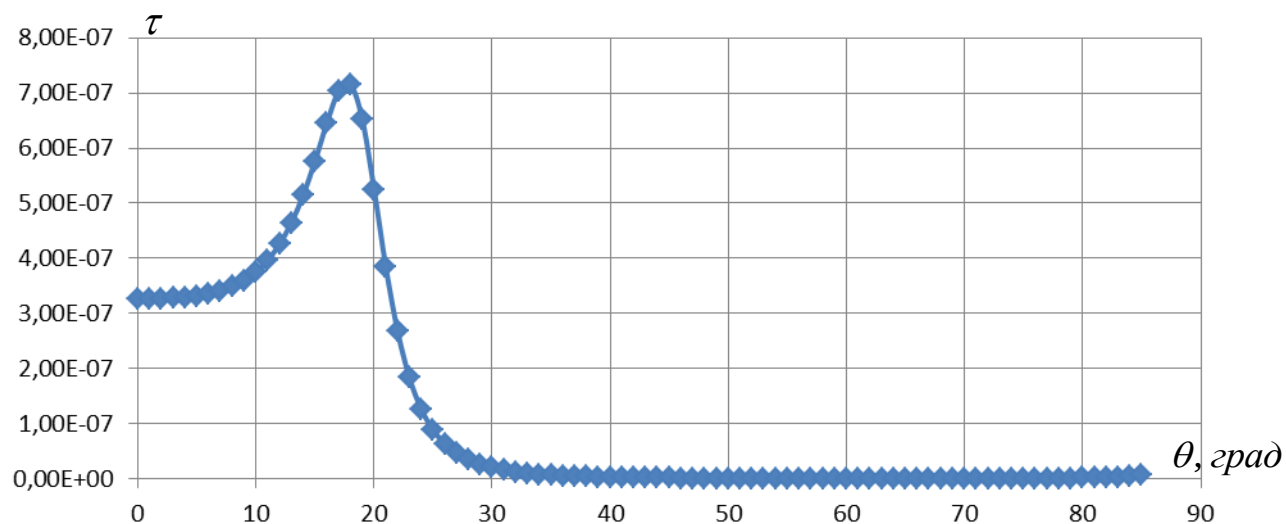
$$f = 38 \cdot 10^3 \text{ Гц}.$$

дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$				$f = 38 \cdot 10^3 \text{ Гц}$	
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	$3,993 \cdot 10^{-7}$	30	$3,902 \cdot 10^{-8}$	60	$1,090 \cdot 10^{-9}$
1	$3,994 \cdot 10^{-7}$	31	$3,037 \cdot 10^{-8}$	61	$1,069 \cdot 10^{-9}$
2	$3,998 \cdot 10^{-7}$	32	$2,398 \cdot 10^{-8}$	62	$1,056 \cdot 10^{-9}$
3	$4,006 \cdot 10^{-7}$	33	$1,920 \cdot 10^{-8}$	63	$1,049 \cdot 10^{-9}$
4	$4,021 \cdot 10^{-7}$	34	$1,555 \cdot 10^{-8}$	64	$1,048 \cdot 10^{-9}$
5	$4,046 \cdot 10^{-7}$	35	$1,275 \cdot 10^{-8}$	65	$1,054 \cdot 10^{-9}$
6	$4,084 \cdot 10^{-7}$	36	$1,056 \cdot 10^{-8}$	66	$1,066 \cdot 10^{-9}$
7	$4,141 \cdot 10^{-7}$	37	$8,841 \cdot 10^{-9}$	67	$1,087 \cdot 10^{-9}$
8	$4,224 \cdot 10^{-7}$	38	$7,470 \cdot 10^{-9}$	68	$1,115 \cdot 10^{-9}$
9	$4,340 \cdot 10^{-7}$	39	$6,368 \cdot 10^{-9}$	69	$1,152 \cdot 10^{-9}$
10	$4,500 \cdot 10^{-7}$	40	$5,475 \cdot 10^{-9}$	70	$1,200 \cdot 10^{-9}$
11	$4,716 \cdot 10^{-7}$	41	$4,746 \cdot 10^{-9}$	71	$1,259 \cdot 10^{-9}$
12	$5,005 \cdot 10^{-7}$	42	$4,145 \cdot 10^{-9}$	72	$1,333 \cdot 10^{-9}$
13	$5,387 \cdot 10^{-7}$	43	$3,648 \cdot 10^{-9}$	73	$1,424 \cdot 10^{-9}$
14	$5,883 \cdot 10^{-7}$	44	$3,233 \cdot 10^{-9}$	74	$1,537 \cdot 10^{-9}$
15	$6,511 \cdot 10^{-7}$	45	$2,886 \cdot 10^{-9}$	75	$1,676 \cdot 10^{-9}$
16	$7,266 \cdot 10^{-7}$	46	$2,593 \cdot 10^{-9}$	76	$1,850 \cdot 10^{-9}$
17	$8,074 \cdot 10^{-7}$	47	$2,344 \cdot 10^{-9}$	77	$2,068 \cdot 10^{-9}$
18	$8,719 \cdot 10^{-7}$	48	$2,134 \cdot 10^{-9}$	78	$2,346 \cdot 10^{-9}$
19	$8,828 \cdot 10^{-7}$	49	$1,954 \cdot 10^{-9}$	79	$2,707 \cdot 10^{-9}$
20	$8,087 \cdot 10^{-7}$	50	$1,800 \cdot 10^{-9}$	80	$3,184 \cdot 10^{-9}$
21	$6,627 \cdot 10^{-7}$	51	$1,668 \cdot 10^{-9}$	81	$3,831 \cdot 10^{-9}$
22	$4,973 \cdot 10^{-7}$	52	$1,555 \cdot 10^{-9}$	82	$4,740 \cdot 10^{-9}$
23	$3,552 \cdot 10^{-7}$	53	$1,458 \cdot 10^{-9}$	83	$6,067 \cdot 10^{-9}$
24	$2,495 \cdot 10^{-7}$	54	$1,375 \cdot 10^{-9}$	84	$8,116 \cdot 10^{-9}$
25	$1,759 \cdot 10^{-7}$	55	$1,304 \cdot 10^{-9}$	85	$1,152 \cdot 10^{-8}$
26	$1,256 \cdot 10^{-7}$	56	$1,244 \cdot 10^{-9}$		
27	$9,132 \cdot 10^{-8}$	57	$1,193 \cdot 10^{-9}$		
28	$6,759 \cdot 10^{-8}$	58	$1,151 \cdot 10^{-9}$		
29	$5,093 \cdot 10^{-8}$	59	$1,117 \cdot 10^{-9}$		

Додаток Б-5

(продовження: Залежність звукопроникності τ корпусу ДУСУ2 від кута падіння звукового променя θ за частоти акустичного випромінювання

$$f = 38 \cdot 10^3 \text{ Гц})$$



Додаток Б-6

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя за частоти акустичного випромінювання

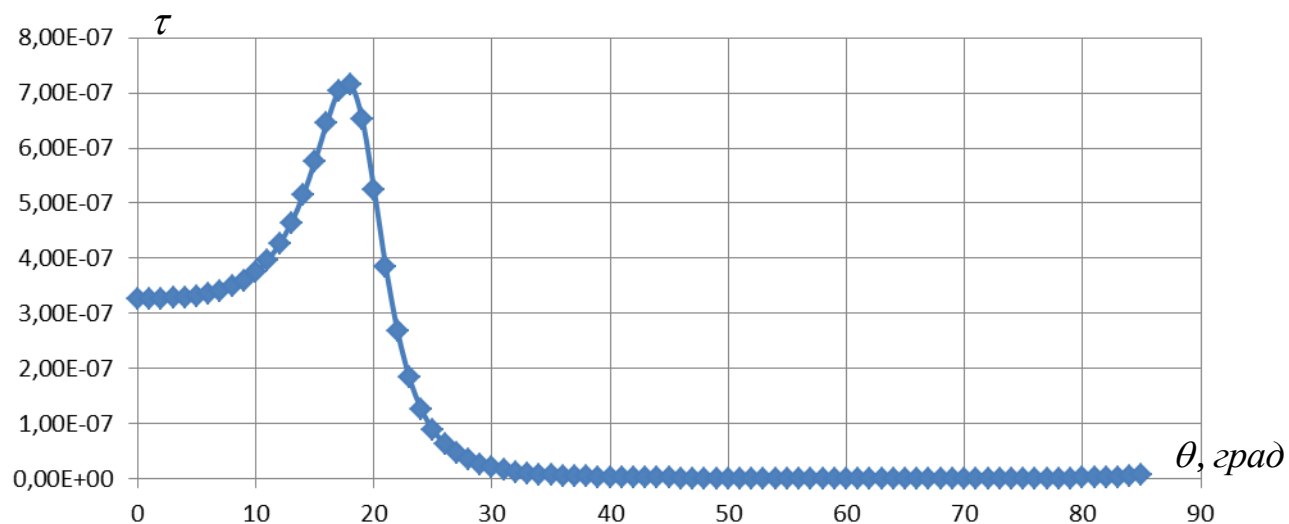
$$f = 39 \cdot 10^3 \text{ Гц}.$$

дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$				$f = 39 \cdot 10^3 \text{ Гц}$	
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	$3,790 \cdot 10^{-7}$	30	$3,288 \cdot 10^{-8}$	60	$9,306 \cdot 10^{-10}$
1	$3,792 \cdot 10^{-7}$	31	$2,563 \cdot 10^{-8}$	61	$9,134 \cdot 10^{-10}$
2	$3,796 \cdot 10^{-7}$	32	$2,027 \cdot 10^{-8}$	62	$9,019 \cdot 10^{-10}$
3	$3,804 \cdot 10^{-7}$	33	$1,624 \cdot 10^{-8}$	63	$8,958 \cdot 10^{-10}$
4	$3,818 \cdot 10^{-7}$	34	$1,317 \cdot 10^{-8}$	64	$8,952 \cdot 10^{-10}$
5	$3,842 \cdot 10^{-7}$	35	$1,081 \cdot 10^{-8}$	65	$9,003 \cdot 10^{-10}$
6	$3,880 \cdot 10^{-7}$	36	$8,962 \cdot 10^{-9}$	66	$9,112 \cdot 10^{-10}$
7	$3,936 \cdot 10^{-7}$	37	$7,506 \cdot 10^{-9}$	67	$9,284 \cdot 10^{-10}$
8	$4,018 \cdot 10^{-7}$	38	$6,346 \cdot 10^{-9}$	68	$9,526 \cdot 10^{-10}$
9	$4,133 \cdot 10^{-7}$	39	$5,414 \cdot 10^{-9}$	69	$9,845 \cdot 10^{-10}$
10	$4,292 \cdot 10^{-7}$	40	$4,657 \cdot 10^{-9}$	70	$1,025 \cdot 10^{-9}$
11	$4,508 \cdot 10^{-7}$	41	$4,038 \cdot 10^{-9}$	71	$1,076 \cdot 10^{-9}$
12	$4,797 \cdot 10^{-7}$	42	$3,529 \cdot 10^{-9}$	72	$1,139 \cdot 10^{-9}$
13	$5,180 \cdot 10^{-7}$	43	$3,107 \cdot 10^{-9}$	73	$1,217 \cdot 10^{-9}$
14	$5,678 \cdot 10^{-7}$	44	$2,754 \cdot 10^{-9}$	74	$1,314 \cdot 10^{-9}$
15	$6,305 \cdot 10^{-7}$	45	$2,459 \cdot 10^{-9}$	75	$1,433 \cdot 10^{-9}$
16	$7,048 \cdot 10^{-7}$	46	$2,210 \cdot 10^{-9}$	76	$1,581 \cdot 10^{-9}$
17	$7,811 \cdot 10^{-7}$	47	$1,999 \cdot 10^{-9}$	77	$1,767 \cdot 10^{-9}$
18	$8,342 \cdot 10^{-7}$	48	$1,819 \cdot 10^{-9}$	78	$2,005 \cdot 10^{-9}$
19	$8,256 \cdot 10^{-7}$	49	$1,666 \cdot 10^{-9}$	79	$2,314 \cdot 10^{-9}$
20	$7,324 \cdot 10^{-7}$	50	$1,535 \cdot 10^{-9}$	80	$2,721 \cdot 10^{-9}$
21	$5,813 \cdot 10^{-7}$	51	$1,423 \cdot 10^{-9}$	81	$3,275 \cdot 10^{-9}$
22	$4,260 \cdot 10^{-7}$	52	$1,327 \cdot 10^{-9}$	82	$4,051 \cdot 10^{-9}$
23	$3,001 \cdot 10^{-7}$	53	$1,244 \cdot 10^{-9}$	83	$5,186 \cdot 10^{-9}$
24	$2,095 \cdot 10^{-7}$	54	$1,174 \cdot 10^{-9}$	84	$6,937 \cdot 10^{-9}$
25	$1,473 \cdot 10^{-7}$	55	$1,113 \cdot 10^{-9}$	85	$9,844 \cdot 10^{-9}$
26	$1,053 \cdot 10^{-7}$	56	$1,062 \cdot 10^{-9}$		
27	$7,658 \cdot 10^{-8}$	57	$1,019 \cdot 10^{-9}$		
28	$5,677 \cdot 10^{-8}$	58	$9,828 \cdot 10^{-10}$		
29	$4,285 \cdot 10^{-8}$	59	$9,536 \cdot 10^{-10}$		

Додаток Б-6

(продовження: Залежність звукопроникності τ корпусу ДУСУ2 від кута падіння звукового променя θ за частоти акустичного випромінювання

$$f = 39 \cdot 10^3 \text{ Гц})$$



Додаток Б-7

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя за частоти акустичного випромінювання

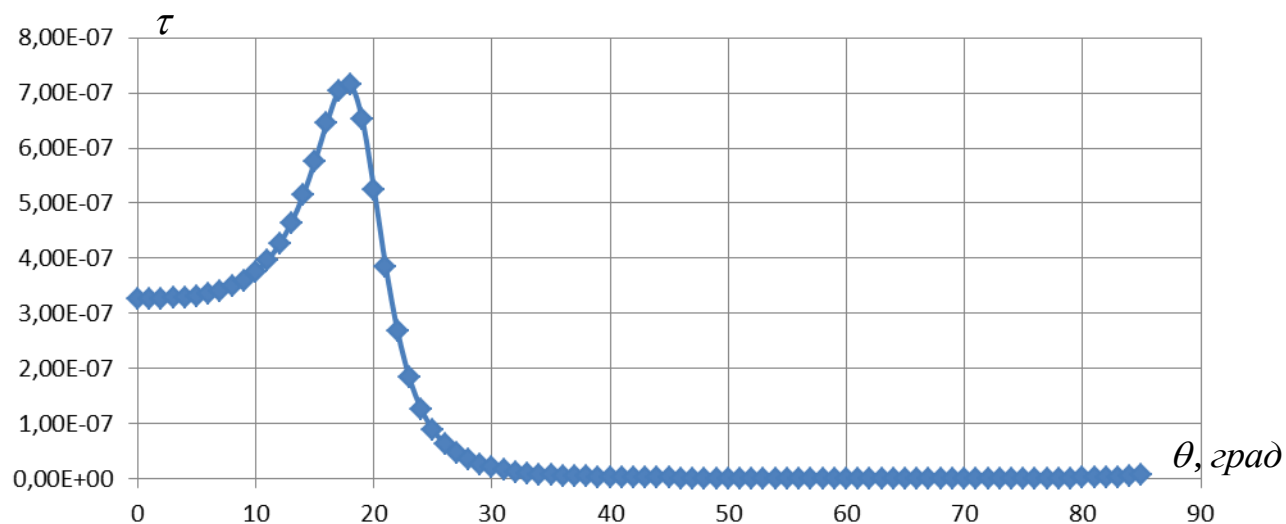
$$f = 40 \cdot 10^3 \text{ Гц}.$$

дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$				$f = 40 \cdot 10^3 \text{ Гц}$	
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	$3,603 \cdot 10^{-7}$	30	$2,785 \cdot 10^{-8}$	60	$7,981 \cdot 10^{-10}$
1	$3,604 \cdot 10^{-7}$	31	$2,174 \cdot 10^{-8}$	61	$7,834 \cdot 10^{-10}$
2	$3,608 \cdot 10^{-7}$	32	$1,721 \cdot 10^{-8}$	62	$7,735 \cdot 10^{-10}$
3	$3,616 \cdot 10^{-7}$	33	$1,380 \cdot 10^{-8}$	63	$7,684 \cdot 10^{-10}$
4	$3,630 \cdot 10^{-7}$	34	$1,121 \cdot 10^{-8}$	64	$7,679 \cdot 10^{-10}$
5	$3,654 \cdot 10^{-7}$	35	$9,205 \cdot 10^{-8}$	65	$7,723 \cdot 10^{-10}$
6	$3,691 \cdot 10^{-7}$	36	$7,639 \cdot 10^{-9}$	66	$7,817 \cdot 10^{-10}$
7	$3,746 \cdot 10^{-7}$	37	$6,402 \cdot 10^{-9}$	67	$7,965 \cdot 10^{-10}$
8	$3,827 \cdot 10^{-7}$	38	$5,416 \cdot 10^{-9}$	68	$8,173 \cdot 10^{-10}$
9	$3,942 \cdot 10^{-7}$	39	$4,623 \cdot 10^{-9}$	69	$8,447 \cdot 10^{-10}$
10	$4,100 \cdot 10^{-7}$	40	$3,978 \cdot 10^{-9}$	70	$8,796 \cdot 10^{-10}$
11	$4,316 \cdot 10^{-7}$	41	$3,451 \cdot 10^{-9}$	71	$9,234 \cdot 10^{-10}$
12	$4,605 \cdot 10^{-7}$	42	$3,017 \cdot 10^{-9}$	72	$9,777 \cdot 10^{-10}$
13	$4,989 \cdot 10^{-7}$	43	$2,657 \cdot 10^{-9}$	73	$1,045 \cdot 10^{-9}$
14	$5,488 \cdot 10^{-7}$	44	$2,357 \cdot 10^{-9}$	74	$1,127 \cdot 10^{-9}$
15	$6,113 \cdot 10^{-7}$	45	$2,104 \cdot 10^{-9}$	75	$1,229 \cdot 10^{-9}$
16	$6,841 \cdot 10^{-7}$	46	$1,892 \cdot 10^{-9}$	76	$1,357 \cdot 10^{-9}$
17	$7,551 \cdot 10^{-7}$	47	$1,711 \cdot 10^{-9}$	77	$1,517 \cdot 10^{-9}$
18	$7,957 \cdot 10^{-7}$	48	$1,558 \cdot 10^{-9}$	78	$1,721 \cdot 10^{-9}$
19	$7,677 \cdot 10^{-7}$	49	$1,427 \cdot 10^{-9}$	79	$1,985 \cdot 10^{-9}$
20	$6,591 \cdot 10^{-7}$	50	$1,315 \cdot 10^{-9}$	80	$2,335 \cdot 10^{-9}$
21	$5,078 \cdot 10^{-7}$	51	$1,219 \cdot 10^{-9}$	81	$2,811 \cdot 10^{-9}$
22	$3,646 \cdot 10^{-7}$	52	$1,137 \cdot 10^{-9}$	82	$3,477 \cdot 10^{-9}$
23	$2,540 \cdot 10^{-7}$	53	$1,067 \cdot 10^{-9}$	83	$4,451 \cdot 10^{-9}$
24	$1,764 \cdot 10^{-7}$	54	$1,006 \cdot 10^{-9}$	84	$5,954 \cdot 10^{-9}$
25	$1,240 \cdot 10^{-7}$	55	$9,543 \cdot 10^{-10}$	85	$8,448 \cdot 10^{-9}$
26	$8,860 \cdot 10^{-8}$	56	$9,104 \cdot 10^{-10}$		
27	$6,455 \cdot 10^{-8}$	57	$8,735 \cdot 10^{-10}$		
28	$4,792 \cdot 10^{-8}$	58	$8,428 \cdot 10^{-10}$		
29	$3,623 \cdot 10^{-8}$	59	$8,178 \cdot 10^{-10}$		

Додаток Б-7

(продовження: Залежність звукопроникності τ корпусу ДУСУ2 від кута падіння звукового променя θ за частоти акустичного випромінювання

$$f = 40 \cdot 10^3 \text{ Гц})$$



Додаток Б-8

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя за частоти акустичного випромінювання

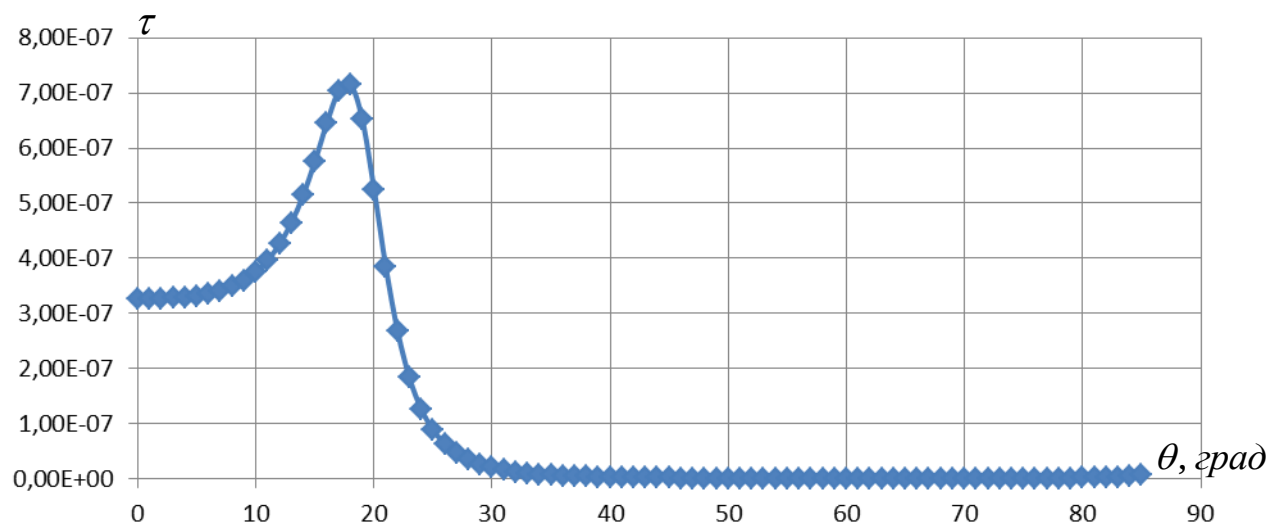
$$f = 41 \cdot 10^3 \text{ Гц}.$$

дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$				$f = 41 \cdot 10^3 \text{ Гц}$	
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	$3,430 \cdot 10^{-7}$	30	$2,369 \cdot 10^{-8}$	60	$6,871 \cdot 10^{-10}$
1	$3,431 \cdot 10^{-7}$	31	$1,852 \cdot 10^{-8}$	61	$6,745 \cdot 10^{-10}$
2	$3,434 \cdot 10^{-7}$	32	$1,468 \cdot 10^{-8}$	62	$6,661 \cdot 10^{-10}$
3	$3,442 \cdot 10^{-7}$	33	$1,179 \cdot 10^{-8}$	63	$6,616 \cdot 10^{-10}$
4	$3,456 \cdot 10^{-7}$	34	$9,580 \cdot 10^{-9}$	64	$6,613 \cdot 10^{-10}$
5	$3,479 \cdot 10^{-7}$	35	$7,874 \cdot 10^{-9}$	65	$6,651 \cdot 10^{-10}$
6	$3,515 \cdot 10^{-7}$	36	$6,539 \cdot 10^{-9}$	66	$6,732 \cdot 10^{-10}$
7	$3,570 \cdot 10^{-7}$	37	$5,484 \cdot 10^{-9}$	67	$6,860 \cdot 10^{-10}$
8	$3,650 \cdot 10^{-7}$	38	$4,642 \cdot 10^{-9}$	68	$7,039 \cdot 10^{-10}$
9	$3,764 \cdot 10^{-7}$	39	$3,964 \cdot 10^{-9}$	69	$7,275 \cdot 10^{-10}$
10	$3,922 \cdot 10^{-7}$	40	$3,413 \cdot 10^{-9}$	70	$7,576 \cdot 10^{-10}$
11	$4,137 \cdot 10^{-7}$	41	$2,962 \cdot 10^{-9}$	71	$7,954 \cdot 10^{-10}$
12	$4,427 \cdot 10^{-7}$	42	$2,590 \cdot 10^{-9}$	72	$8,421 \cdot 10^{-10}$
13	$4,812 \cdot 10^{-7}$	43	$2,282 \cdot 10^{-9}$	73	$8,998 \cdot 10^{-10}$
14	$5,312 \cdot 10^{-7}$	44	$2,024 \cdot 10^{-9}$	74	$9,709 \cdot 10^{-10}$
15	$5,935 \cdot 10^{-7}$	45	$1,808 \cdot 10^{-9}$	75	$1,059 \cdot 10^{-9}$
16	$6,644 \cdot 10^{-7}$	46	$1,626 \cdot 10^{-9}$	76	$1,169 \cdot 10^{-9}$
17	$7,291 \cdot 10^{-7}$	47	$1,471 \cdot 10^{-9}$	77	$1,307 \cdot 10^{-9}$
18	$7,561 \cdot 10^{-7}$	48	$1,340 \cdot 10^{-9}$	78	$1,483 \cdot 10^{-9}$
19	$7,097 \cdot 10^{-7}$	49	$1,227 \cdot 10^{-9}$	79	$1,710 \cdot 10^{-9}$
20	$5,898 \cdot 10^{-7}$	50	$1,131 \cdot 10^{-9}$	80	$2,012 \cdot 10^{-9}$
21	$4,421 \cdot 10^{-7}$	51	$1,049 \cdot 10^{-9}$	81	$2,421 \cdot 10^{-9}$
22	$3,120 \cdot 10^{-7}$	52	$9,783 \cdot 10^{-10}$	82	$2,995 \cdot 10^{-9}$
23	$2,154 \cdot 10^{-7}$	53	$9,176 \cdot 10^{-10}$	83	$3,835 \cdot 10^{-9}$
24	$1,492 \cdot 10^{-7}$	54	$8,657 \cdot 10^{-10}$	84	$5,129 \cdot 10^{-9}$
25	$1,047 \cdot 10^{-7}$	55	$8,213 \cdot 10^{-10}$	85	$7,278 \cdot 10^{-9}$
26	$7,492 \cdot 10^{-8}$	56	$7,836 \cdot 10^{-10}$		
27	$5,466 \cdot 10^{-8}$	57	$7,518 \cdot 10^{-10}$		
28	$4,065 \cdot 10^{-8}$	58	$7,255 \cdot 10^{-10}$		
29	$3,078 \cdot 10^{-8}$	59	$7,040 \cdot 10^{-10}$		

Додаток Б-8

(продовження: Залежність звукопроникності τ корпусу ДУСУ2 від кута падіння звукового променя θ за частоти акустичного випромінювання

$$f = 41 \cdot 10^3 \text{ Гц})$$



Додаток Б-9

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута падіння звукового променя за частоти акустичного випромінювання

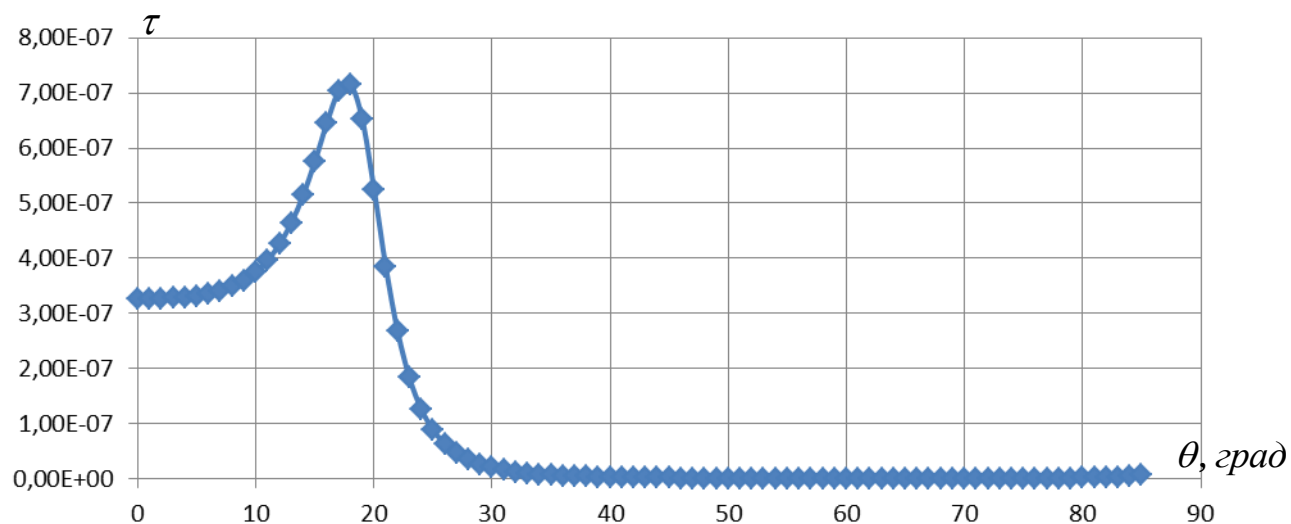
$$f = 42 \cdot 10^3 \text{ Гц}.$$

дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$				$f = 42 \cdot 10^3 \text{ Гц}$	
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	$3,268 \cdot 10^{-7}$	30	$2,025 \cdot 10^{-8}$	60	$5,938 \cdot 10^{-10}$
1	$3,269 \cdot 10^{-7}$	31	$1,585 \cdot 10^{-8}$	61	$5,829 \cdot 10^{-10}$
2	$3,273 \cdot 10^{-7}$	32	$1,257 \cdot 10^{-8}$	62	$5,756 \cdot 10^{-10}$
3	$3,280 \cdot 10^{-7}$	33	$1,011 \cdot 10^{-8}$	63	$5,718 \cdot 10^{-10}$
4	$3,294 \cdot 10^{-7}$	34	$8,222 \cdot 10^{-9}$	64	$5,715 \cdot 10^{-10}$
5	$3,316 \cdot 10^{-7}$	35	$6,763 \cdot 10^{-9}$	65	$5,748 \cdot 10^{-10}$
6	$3,352 \cdot 10^{-7}$	36	$5,620 \cdot 10^{-9}$	66	$5,819 \cdot 10^{-10}$
7	$3,406 \cdot 10^{-7}$	37	$4,716 \cdot 10^{-9}$	67	$5,930 \cdot 10^{-10}$
8	$3,486 \cdot 10^{-7}$	38	$3,994 \cdot 10^{-9}$	68	$6,085 \cdot 10^{-10}$
9	$3,599 \cdot 10^{-7}$	39	$3,412 \cdot 10^{-9}$	69	$6,289 \cdot 10^{-10}$
10	$3,756 \cdot 10^{-7}$	40	$2,939 \cdot 10^{-9}$	70	$6,549 \cdot 10^{-10}$
11	$3,972 \cdot 10^{-7}$	41	$2,552 \cdot 10^{-9}$	71	$6,876 \cdot 10^{-10}$
12	$4,262 \cdot 10^{-7}$	42	$2,232 \cdot 10^{-9}$	72	$7,280 \cdot 10^{-10}$
13	$4,648 \cdot 10^{-7}$	43	$1,967 \cdot 10^{-9}$	73	$7,779 \cdot 10^{-10}$
14	$5,149 \cdot 10^{-7}$	44	$1,746 \cdot 10^{-9}$	74	$8,394 \cdot 10^{-10}$
15	$5,767 \cdot 10^{-7}$	45	$1,560 \cdot 10^{-9}$	75	$9,155 \cdot 10^{-10}$
16	$6,453 \cdot 10^{-7}$	46	$1,403 \cdot 10^{-9}$	76	$1,010 \cdot 10^{-9}$
17	$7,030 \cdot 10^{-7}$	47	$1,270 \cdot 10^{-9}$	77	$1,130 \cdot 10^{-9}$
18	$7,157 \cdot 10^{-7}$	48	$1,156 \cdot 10^{-9}$	78	$1,282 \cdot 10^{-9}$
19	$6,524 \cdot 10^{-7}$	49	$1,060 \cdot 10^{-9}$	79	$1,479 \cdot 10^{-9}$
20	$5,252 \cdot 10^{-7}$	50	$9,767 \cdot 10^{-9}$	80	$1,740 \cdot 10^{-9}$
21	$3,841 \cdot 10^{-7}$	51	$9,057 \cdot 10^{-10}$	81	$2,094 \cdot 10^{-9}$
22	$2,671 \cdot 10^{-7}$	52	$8,448 \cdot 10^{-10}$	82	$2,590 \cdot 10^{-9}$
23	$1,832 \cdot 10^{-7}$	53	$7,925 \cdot 10^{-10}$	83	$3,316 \cdot 10^{-9}$
24	$1,266 \cdot 10^{-7}$	54	$7,477 \cdot 10^{-10}$	84	$4,435 \cdot 10^{-9}$
25	$8,887 \cdot 10^{-8}$	55	$7,094 \cdot 10^{-10}$	85	$6,293 \cdot 10^{-9}$
26	$6,364 \cdot 10^{-8}$	56	$6,769 \cdot 10^{-10}$		
27	$4,650 \cdot 10^{-8}$	57	$6,495 \cdot 10^{-10}$		
28	$3,464 \cdot 10^{-8}$	58	$6,268 \cdot 10^{-10}$		
29	$2,627 \cdot 10^{-8}$	59	$6,083 \cdot 10^{-10}$		

Додаток Б-9

(продовження: Залежність звукопроникності τ корпусу ДУСУ2 від кута падіння звукового променя θ за частоти акустичного випромінювання

$$f = 42 \cdot 10^3 \text{ Гц})$$



Додаток Б-10

Програма обчислень резонансних значень кута ψ для колової хвилі.

$$2\pi R \frac{f}{c_1} = \sin^2 \psi$$

$$R := 0.025$$

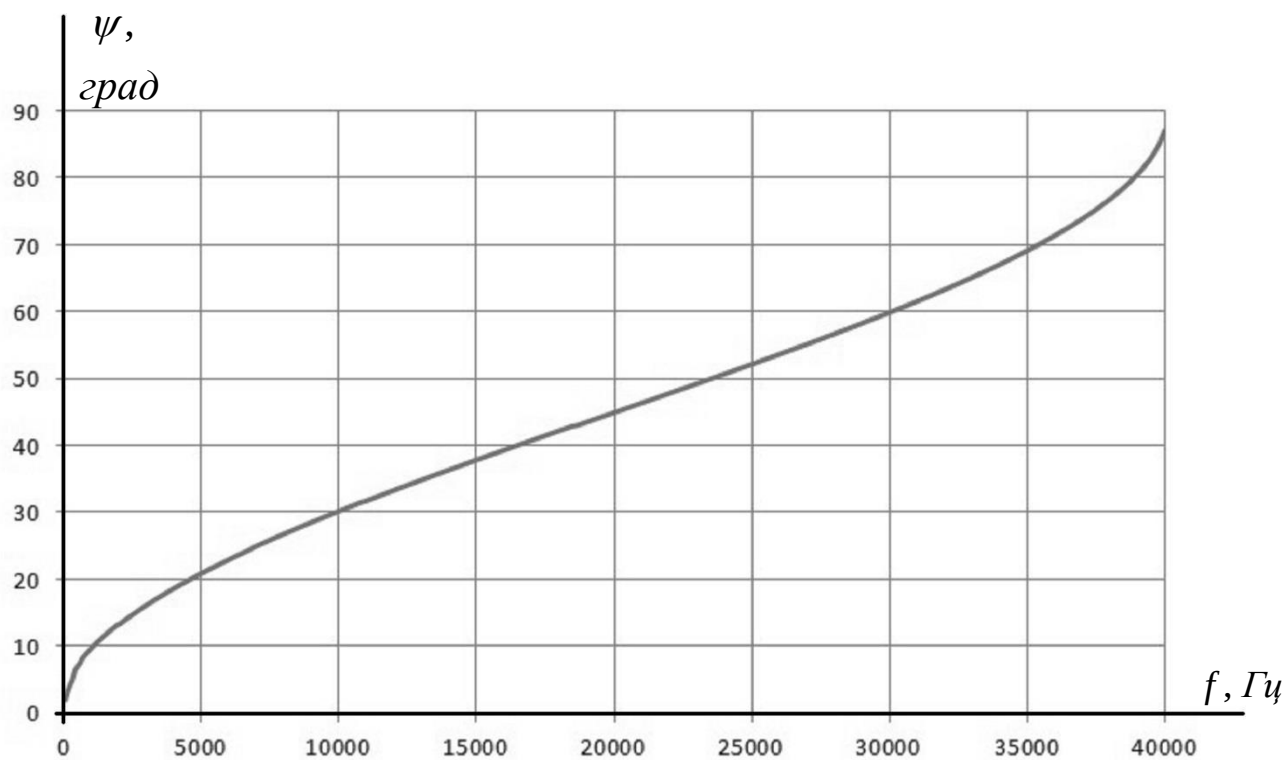
$$f := 50..40000$$

$$c_1 := 6300$$

$$\psi := \left| \begin{array}{l} c_1 \leftarrow 6300 \\ R \leftarrow 0.025 \\ fmin \leftarrow 50 \\ fmax \leftarrow 40000 \\ \text{for } i \in fmin, 100..fmax \\ \quad \left| \begin{array}{l} fi \leftarrow 0 + i \\ \psi_i \leftarrow asin \left[\left[2\pi \cdot R \cdot \left(\frac{fi}{c_1} \right) \right]^{0.5} \right] \end{array} \right. \\ \psi \leftarrow \psi \cdot \frac{180}{\pi} \end{array} \right.$$

Додаток Б-10

(продовження: Залежність резонансних значень кута ψ від частоти колової хвилі f)



Додаток Б-10

(продовження: Резонансні значення кута ψ для колової хвилі)

дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$					
$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$
50	2°01'	1550	11°53'	3050	16°16'
100	2°52'	1600	12°03'	3100	16°24'
150	3°30'	1650	12°14'	3150	16°32'
200	4°03'	1700	12°24'	3200	16°40'
250	4°32'	1750	12°34'	3250	16°48'
300	4°58'	1800	12°44'	3300	16°56'
350	5°44'	1850	12°54'	3350	17°03'
400	6°25'	1900	13°04'	3400	17°11'
450	6°44'	1950	13°14'	3450	17°18'
500	7°02'	2000	13°17'	3500	17°26'
550	7°19'	2050	13°23'	3550	17°33'
600	7°36'	2100	13°33'	3600	17°41'
650	8°07'	2150	13°42'	3650	17°48'
700	8°22'	2200	13°51'	3700	17°56'
750	8°37'	2250	14°00'	3750	18°03'
800	8°51'	2300	14°10'	3800	18°10'
850	9°05'	2350	14°19'	3850	18°17'
900	9°19'	2400	14°27'	3900	18°25'
950	9°32'	2450	14°36'	3950	18°32'
1000	9°45'	2500	14°45'	4000	18°39'
1050	9°58'	2550	14°54'	4050	18°46'
1100	10°10'	2600	15°02'	4100	18°53'
1150	10°22'	2650	15°11'	4150	19°00'
1200	10°34'	2700	15°19'	4200	19°07'
1250	10°46'	2750	15°28'	4250	19°14'
1300	10°58'	2800	15°36'	4300	19°21'
1350	11°09'	2850	15°44'	4350	19°27'
1400	11°20'	2900	15°52'	4400	19°34'
1450	11°31'	2950	16°00'	4450	19°41'
1500	11°42'	3000	16°09'	4500	19°48'

Додаток Б-10

(продовження)

Дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$					
$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$
4550	19°54'	6050	23°03'	7550	25°59'
4600	20°01'	6100	23°09'	7600	26°05'
4650	20°08'	6150	23°15'	7650	26°10'
4700	20°14'	6200	23°21'	7700	26°15'
4750	20°21'	6250	23°27'	7750	26°21'
4800	20°28'	6300	23°33'	7800	26°26'
4850	20°34'	6350	23°39'	7850	26°32'
4900	20°41'	6400	23°44'	7900	26°37'
4950	20°47'	6450	23°50'	7950	26°42'
5000	20°53'	6500	23°56'	8000	26°48'
5050	21°00'	6550	24°02'	8050	26°53'
5100	21°06'	6600	24°08'	8100	26°58'
5150	21°13'	6650	24°13'	8150	27°04'
5200	21°19'	6700	24°19'	8200	27°09'
5250	21°25'	6750	24°25'	8250	27°14'
5300	21°32'	6800	24°30'	8300	27°19'
5350	21°38'	6850	24°42'	8350	27°25'
5400	21°44'	6900	24°47'	8400	27°30'
5450	21°50'	6950	24°53'	8450	27°35'
5500	21°57'	7000	24°59'	8500	27°40'
5550	22°03'	7050	25°04'	8550	27°46'
5600	22°09'	7100	25°10'	8600	27°51'
5650	22°15'	7150	25°15'	8650	27°56'
5700	22°21'	7200	25°21'	8700	28°01'
5750	22°27'	7250	25°26'	8750	28°06'
5800	22°33'	7300	25°32'	8800	28°11'
5850	22°39'	7350	25°37'	8850	28°16'
5900	22°45'	7400	25°43'	8900	28°22'
5950	22°51'	7450	25°48'	8950	28°27'
6000	22°57'	7500	25°54'	9000	28°32'

Додаток Б-10

(продовження)

Дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$					
$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$
9050	28°37'	10550	31°06'	12050	33°24'
9100	28°42'	10600	31°11'	12100	33°28'
9150	28°47'	10650	31°16'	12150	33°33'
9200	28°52'	10700	31°20'	12200	33°38'
9250	28°57'	10750	31°25'	12250	33°42'
9300	29°02'	10800	31°30'	12300	33°47'
9350	29°07'	10850	31°35'	12350	33°52'
9400	29°12'	10900	31°38'	12400	33°56'
9450	29°17'	10950	31°40'	12450	34°01'
9500	29°23'	11000	31°44'	12500	34°05'
9550	29°27'	11050	31°49'	12550	34°10'
9600	29°32'	11100	31°54'	12600	34°15'
9650	29°38'	11150	31°59'	12650	34°19'
9700	29°42'	11200	32°04'	12700	34°24'
9750	29°47'	11250	32°08'	12750	34°28'
9800	29°52'	11300	32°13'	12800	34°33'
9850	29°57'	11350	32°18'	12850	34°38'
9900	30°02'	11400	32°23'	12900	34°42'
9950	30°07'	11450	32°27'	12950	34°47'
10000	30°12'	11500	32°32'	13000	34°51'
10050	30°17'	11550	32°37'	13050	34°56'
10100	30°22'	11600	32°41'	13100	35°00'
10150	30°27'	11650	32°46'	13150	35°05'
10200	30°32'	11700	32°51'	13200	35°10'
10250	30°37'	11750	32°56'	13250	35°14'
10300	30°42'	11800	33°00'	13300	35°19'
10350	30°46'	11850	33°05'	13350	35°23'
10400	30°51'	11900	33°10'	13400	35°28'
10450	30°56'	11950	33°14'	13450	35°32'
10500	31°01'	12000	33°19'	13500	35°37'

Додаток Б-10

(продовження)

Дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$					
$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$
13550	35°41'	15050	37°55'	16550	40°07'
13600	35°46'	15100	38°00'	16600	40°11'
13650	35°50'	15150	38°04'	16650	40°16'
13700	35°55'	15200	38°09'	16700	40°20'
13750	35°59'	15250	38°13'	16750	40°24'
13800	36°04'	15300	38°17'	16800	40°29'
13850	36°08'	15350	38°22'	16850	40°33'
13900	36°13'	15400	38°26'	16900	40°37'
13950	36°17'	15450	38°31'	16950	40°42'
14000	36°22'	15500	38°35'	17000	40°46'
14050	36°26'	15550	38°39'	17050	40°50'
14100	36°31'	15600	38°44'	17100	40°55'
14150	36°35'	15650	38°48'	17150	40°59'
14200	36°40'	15700	38°53'	17200	41°03'
14250	36°44'	15750	38°57'	17250	41°08'
14300	36°49'	15800	39°01'	17300	41°12'
14350	36°53'	15850	39°06'	17350	41°16'
14400	36°58'	15900	39°10'	17400	41°21'
14450	37°02'	15950	39°15'	17450	41°25'
14500	37°07'	16000	39°19'	17500	41°29'
14550	37°11'	16050	39°23'	17550	41°33'
14600	37°15'	16100	39°28'	17600	41°38'
14650	37°20'	16150	39°32'	17650	41°42'
14700	37°24'	16200	39°36'	17700	41°46'
14750	37°29'	16250	39°41'	17750	41°51'
14800	37°33'	16300	39°45'	17800	41°55'
14850	37°38'	16350	39°49'	17850	41°59'
14900	37°42'	16400	39°54'	17900	42°04'
14950	37°47'	16450	39°58'	17950	42°08'
15000	37°51'	16500	40°03'	18000	42°12'

Додаток Б-10

(продовження)

Дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$					
$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$
18050	42°17'	19550	44°17'	21050	46°25'
18100	42°21'	19600	44°21'	21100	46°30'
18150	42°25'	19650	44°25'	21150	46°34'
18200	42°30'	19700	44°30'	21200	46°38'
18250	42°34'	19750	44°34'	21250	46°43'
18300	42°38'	19800	44°38'	21300	46°47'
18350	42°42'	19850	44°43'	21350	46°51'
18400	42°47'	19900	44°47'	21400	46°55'
18450	42°51'	19950	44°51'	21450	47°00'
18500	42°53'	20000	44°55'	21500	47°04'
18550	42°55'	20050	45°00'	21550	47°08'
18600	42°57'	20100	45°04'	21600	47°13'
18650	43°00'	20150	45°08'	21650	47°17'
18700	43°04'	20200	45°13'	21700	47°21'
18750	43°08'	20250	45°17'	21750	47°26'
18800	43°12'	20300	45°21'	21800	47°30'
18850	43°17'	20350	45°25'	21850	47°34'
18900	43°21'	20400	45°30'	21900	47°39'
18950	43°25'	20450	45°34'	21950	47°43'
19000	43°30'	20500	45°38'	22000	47°47'
19050	43°34'	20550	45°43'	22050	47°51'
19100	43°38'	20600	45°47'	22100	47°56'
19150	43°43'	20650	45°51'	22150	48°00'
19200	43°47'	20700	45°55'	22200	48°04'
19250	43°51'	20750	46°00'	22250	48°09'
19300	43°55'	20800	46°04'	22300	48°13'
19350	44°00'	20850	46°08'	22350	48°17'
19400	44°04'	20900	46°13'	22400	48°22'
19450	44°08'	20950	46°17'	22450	48°26'
19500	44°13'	21000	46°21'	22500	48°30'

Додаток Б-10

(продовження)

Дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$					
$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$
22550	48°30'	24050	50°40'	25550	52°57'
22600	48°35'	24100	50°45'	25600	53°02'
22650	48°39'	24150	50°49'	25650	53°06'
22700	48°43'	24200	50°54'	25700	53°11'
22750	48°48'	24250	50°58'	25750	53°15'
22800	48°52'	24300	51°02'	25800	53°20'
22850	48°56'	24350	51°07'	25850	53°24'
22900	49°00'	24400	51°11'	25900	53°29'
22950	49°05'	24450	51°16'	25950	53°33'
23000	49°09'	24500	51°20'	26000	53°38'
23050	49°14'	24550	51°24'	26050	53°42'
23100	49°18'	24600	51°29'	26100	53°46'
23150	49°22'	24650	51°33'	26150	53°51'
23200	49°26'	24700	51°38'	26200	53°55'
23250	49°31'	24750	51°42'	26250	54°00'
23300	49°35'	24800	51°46'	26300	54°05'
23350	49°39'	24850	51°51'	26350	54°09'
23400	49°44'	24900	51°55'	26400	54°14'
23450	49°48'	24950	52°04'	26450	54°18'
23500	49°53'	25000	52°08'	26500	54°23'
23550	49°57'	25050	52°13'	26550	54°27'
23600	50°01'	25100	52°17'	26600	54°32'
23650	50°06'	25150	52°22'	26650	54°36'
23700	50°10'	25200	52°26'	26700	54°41'
23750	50°14'	25250	52°31'	26750	54°45'
23800	50°19'	25300	52°35'	26800	54°50'
23850	50°23'	25350	52°39'	26850	54°54'
23900	50°27'	25400	52°44'	26900	54°59'
23950	50°32'	25450	52°48'	26950	55°03'
24000	50°36'	25500	52°53'	27000	55°08'

Додаток Б-10

(продовження)

Дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$					
$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$
27050	55°13'	28550	57°32'	30050	59°57'
27100	55°17'	28600	57°37'	30100	60°02'
27150	55°22'	28650	57°42'	30150	60°07'
27200	55°26'	28700	57°46'	30200	60°12'
27250	55°31'	28750	57°51'	30250	60°17'
27300	55°36'	28800	57°56'	30300	60°22'
27350	55°40'	28850	58°01'	30350	60°27'
27400	55°45'	28900	58°05'	30400	60°32'
27450	55°49'	28950	58°10'	30450	60°37'
27500	55°54'	29000	58°15'	30500	60°42'
27550	55°59'	29050	58°20'	30550	60°47'
27600	56°03'	29100	58°24'	30600	60°52'
27650	56°08'	29150	58°29'	30650	60°57'
27700	56°12'	29200	58°34'	30700	61°02'
27750	56°17'	29250	58°39'	30750	61°07'
27800	56°22'	29300	58°44'	30800	61°12'
27850	56°26'	29350	58°49'	30850	61°17'
27900	56°31'	29400	58°53'	30900	61°22'
27950	56°36'	29450	58°58'	30950	61°27'
28000	56°40'	29500	59°03'	31000	61°33'
28050	56°45'	29550	59°08'	31050	61°38'
28100	56°50'	29600	59°13'	31100	61°43'
28150	56°54'	29650	59°18'	31150	61°48'
28200	56°59'	29700	59°23'	31200	61°53'
28250	57°04'	29750	59°27'	31250	61°58'
28300	57°08'	29800	59°32'	31300	62°03'
28350	57°13'	29850	59°37'	31350	62°09'
28400	57°18'	29900	59°42'	31400	62°14'
28450	57°23'	29950	59°47'	31450	62°19'
28500	57°27'	30000	59°52'	31500	62°24'

Додаток Б-10

(продовження)

Дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$					
$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$
31550	62°29'	33050	65°12'	34550	68°09'
31600	62°35'	33100	65°18'	34600	68°15'
31650	62°40'	33150	65°23'	34650	68°21'
31700	62°45'	33200	65°29'	34700	68°28'
31750	62°50'	33250	65°35'	34750	68°34'
31800	62°56'	33300	65°40'	34800	68°40'
31850	63°01'	33350	65°46'	34850	68°46'
31900	63°06'	33400	65°52'	34900	68°53'
31950	63°12'	33450	65°57'	34950	68°59'
32000	63°17'	33500	66°03'	35000	69°06'
32050	63°22'	33550	66°09'	35050	69°12'
32100	63°28'	33600	66°15'	35100	69°19'
32150	63°33'	33650	66°21'	35150	69°25'
32200	63°38'	33700	66°26'	35200	69°32'
32250	63°44'	33750	66°32'	35250	69°38'
32300	63°49'	33800	66°38'	35300	69°45'
32350	63°55'	33850	66°44'	35350	69°51'
32400	64°00'	33900	66°50'	35400	69°58'
32450	64°05'	33950	66°56'	35450	70°05'
32500	64°11'	34000	67°02'	35500	70°11'
32550	64°16'	34050	67°08'	35550	70°18'
32600	64°22'	34100	67°14'	35600	70°25'
32650	64°27'	34150	67°20'	35650	70°32'
32700	64°33'	34200	67°26'	35700	70°38'
32750	64°38'	34250	67°32'	35750	70°45'
32800	64°44'	34300	67°38'	35800	70°52'
32850	64°50'	34350	67°44'	35850	70°59'
32900	64°55'	34400	67°50'	35900	71°06'
32950	65°01'	34450	67°56'	35950	71°13'
33000	65°06'	34500	68°03'	36000	71°20'

Додаток Б-10

(продовження)

Дюралюміній, $c_1 = 6300 \text{ мс}^{-1}$					
$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$	$f, \text{Гц}$	$\psi, \text{град}$
36050	71°27'	37550	75°23'	39050	80°39'
36100	71°34'	37600	75°31'	39100	80°53'
36150	71°42'	37650	75°40'	39150	81°07'
36200	71°49'	37700	75°49'	39200	81°21'
36250	71°56'	37750	75°58'	39250	81°36'
36300	72°03'	37800	76°07'	39300	81°51'
36350	72°11'	37850	76°17'	39350	82°06'
36400	72°18'	37900	76°26'	39400	82°22'
36450	72°25'	37950	76°35'	39450	82°39'
36500	72°33'	38000	76°45'	39500	82°56'
36550	72°40'	38050	76°55'	39550	83°14'
36600	72°48'	38100	77°04'	39600	83°33'
36650	72°56'	38150	77°14'	39650	83°52'
36700	73°03'	38200	77°24'	39700	84°13'
36750	73°11'	38250	77°34'	39750	84°35'
36800	73°19'	38300	77°45'	39800	84°59'
36850	73°27'	38350	77°55'	39850	85°24'
36900	73°34'	38400	78°06'	39900	85°53'
36950	73°42'	38450	78°16'	39950	86°25'
37000	73°50'	38500	78°27'	40000	87°02'
37050	73°58'	38550	78°38'		
37100	74°07'	38600	78°49'		
37150	74°15'	38650	79°01'		
37200	74°23'	38700	79°12'		
37250	74°31'	38750	79°24'		
37300	74°40'	38800	79°36'		
37350	74°48'	38850	79°48'		
37400	74°57'	38900	80°01'		
37450	75°05'	38950	80°13'		
37500	75°14'	39000	80°26'		

Додаток Б-11

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 550 \text{ Гц}$, $\psi = 50,1^\circ$.

$f = 550 \text{ Гц}$					
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	$9,39 \cdot 10^3$	14,5	$2,09 \cdot 10^3$	29	73,86
0,5	$9,46 \cdot 10^3$	15	$1,72 \cdot 10^3$	29,5	68,68
1	$9,68 \cdot 10^3$	15,5	$1,43 \cdot 10^3$	30	63,96
1,5	$1,01 \cdot 10^4$	16	$1,20 \cdot 10^3$	30,5	59,65
2	$1,06 \cdot 10^4$	16,5	$1,02 \cdot 10^3$	31	55,70
2,5	$1,14 \cdot 10^4$	17	$8,74 \cdot 10^2$	31,5	52,08
3	$1,25 \cdot 10^4$	17,5	$7,53 \cdot 10^2$	32	48,76
3,5	$1,41 \cdot 10^4$	18	$6,53 \cdot 10^2$	32,5	45,71
4	$1,62 \cdot 10^4$	18,5	$5,70 \cdot 10^2$	33	42,90
4,5	$1,93 \cdot 10^4$	19	5,00E+02	33,5	40,31
5	$2,39 \cdot 10^4$	19,5	4,41E+02	34	37,91
5,5	$3,11 \cdot 10^4$	20	$3,90 \cdot 10^2$	34,5	35,70
6	$4,37 \cdot 10^4$	20,5	$3,47 \cdot 10^2$	35	33,65
6,5	$6,84 \cdot 10^4$	21	$3,10 \cdot 10^2$	35,5	31,75
7	$1,29 \cdot 10^5$	21,5	$2,78 \cdot 10^2$	36	29,98
7,5	$3,57 \cdot 10^5$	22	$2,50 \cdot 10^2$	36,5	28,34
8	$4,67 \cdot 10^{15}$	22,5	$2,26 \cdot 10^2$	37	26,81
8,5	$1,65 \cdot 10^6$	23	$2,04 \cdot 10^2$	37,5	25,39
9	$2,22 \cdot 10^5$	23,5	$1,85 \cdot 10^2$	38	24,06
9,5	$7,99 \cdot 10^4$	24	$1,69 \cdot 10^2$	38,5	22,82
10	$3,9 \cdot 10^4$	24,5	$1,54 \cdot 10^2$	39	21,67
10,5	$2,30 \cdot 10^4$	25	$1,41 \cdot 10^2$	39,5	20,58
11	$1,47 \cdot 10^4$	25,5	$1,29 \cdot 10^2$	40	19,57
11,5	$1,01 \cdot 10^4$	26	$1,18 \cdot 10^2$	40,5	18,62
12	$7,23 \cdot 10^3$	26,5	$1,09 \cdot 10^2$	41	17,73
12,5	$5,38 \cdot 10^3$	27	$1,00 \cdot 10^2$	41,5	16,89
13	$4,12 \cdot 10^3$	27,5	92,75	42	16,10
13,5	$3,23 \cdot 10^3$	28	85,83	42,5	15,36
14	$2,58 \cdot 10^3$	28,5	79,56	43	14,67

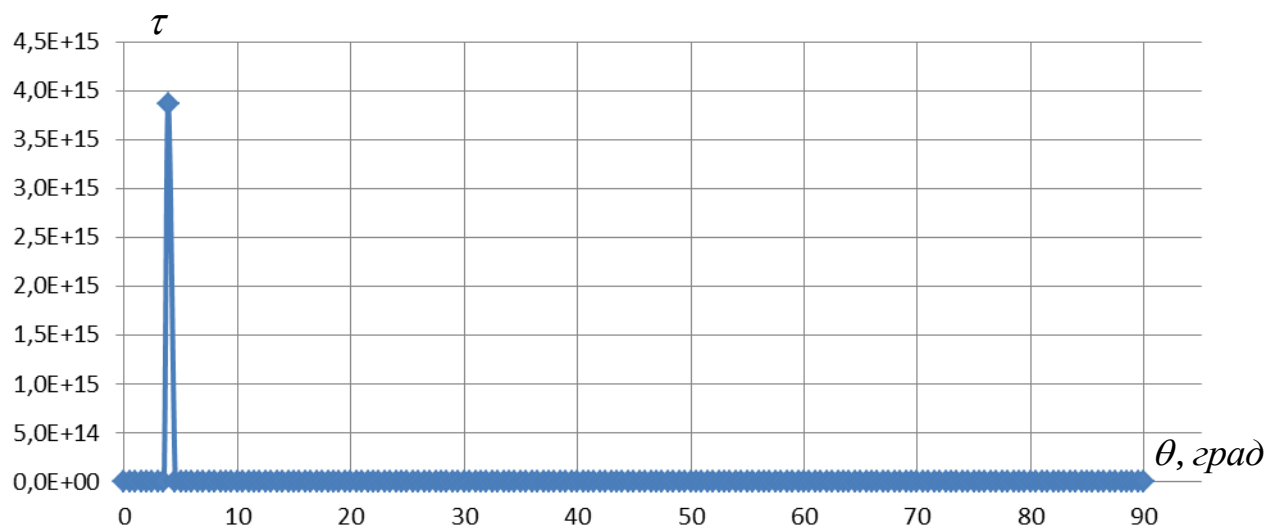
Додаток Б-11

(продовження)

$f = 550 \Gamma\text{ц}$					
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
43,5	14,01	59,5	4,21	75,5	1,79
44	13,39	60	4,08	76	1,75
44,5	12,81	60,5	3,96	76,5	1,71
45	12,26	61	3,84	77	1,67
45,5	11,74	61,5	3,73	77,5	1,64
46	11,25	62	3,62	78	1,60
46,5	10,78	62,5	3,51	78,5	1,57
47	10,34	63	3,41	79	1,53
47,5	9,92	63,5	3,32	79,5	1,50
48	9,53	64	3,22	80	1,47
48,5	9,15	64,5	3,13	80,5	1,44
49	8,80	65	3,05	81	1,41
49,5	8,46	65,5	2,96	81,5	1,38
50	8,14	66	2,88	82	1,35
50,5	7,83	66,5	2,80	82,5	1,33
51	7,54	67	2,73	83	1,30
51,5	7,26	67,5	2,66	83,5	1,27
52	7,00	68	2,59	84	1,25
52,5	6,75	68,5	2,52	84,5	1,23
53	6,51	69	2,46	85	1,20
53,5	6,28	69,5	2,39	85,5	1,18
54	6,06	70	2,33	86	1,16
54,5	5,85	70,5	2,28	86,5	1,14
55	5,66	71	2,22	87	1,11
55,5	5,47	71,5	2,17	87,5	1,09
56	5,28	72	2,11	88	1,07
56,5	5,11	72,5	2,06	88,5	1,06
57	4,94	73	2,01	89	1,04
57,5	4,78	73,5	1,97	89,5	1,02
58	4,63	74	1,92	90	1,00
58,5	4,49	74,5	1,88		
59	4,35	75	1,83		

Додаток Б-11

(продовження: Залежність звукопроникності корпусу ДУСУ2 від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 550 \text{ Гц}$, $\psi = 50,1^\circ$)



Додаток Б-12

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 750 \text{ Гц}$, $\psi = 55,8^\circ$.

$f = 750 \text{ Гц}$					
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	$2,01 \cdot 10^6$	14,5	$1,03 \cdot 10^3$	29	64,24
0,5	$2,24 \cdot 10^6$	15	$8,97 \cdot 10^2$	29,5	60,07
1	$3,26 \cdot 10^6$	15,5	$7,85 \cdot 10^2$	30	56,23
1,5	$7,58 \cdot 10^6$	16	$6,90 \cdot 10^2$	30,5	52,69
2	$7,84 \cdot 10^{15}$	16,5	$6,10 \cdot 10^2$	31	49,44
2,5	$1,65 \cdot 10^7$	17	$5,40 \cdot 10^2$	31,5	46,43
3	$2,26 \cdot 10^6$	17,5	$4,81 \cdot 10^2$	32	43,65
3,5	$7,43 \cdot 10^5$	18	$4,29 \cdot 10^2$	32,5	41,09
4	$3,34 \cdot 10^5$	18,5	$3,84 \cdot 10^2$	33	38,71
4,5	$1,77 \cdot 10^5$	19	$3,45 \cdot 10^2$	33,5	36,50
5	$1,04 \cdot 10^5$	19,5	$3,11 \cdot 10^2$	34	34,45
5,5	$6,57 \cdot 10^4$	20	$2,81 \cdot 10^2$	34,5	32,54
6	$4,38 \cdot 10^4$	20,5	$2,55 \cdot 10^2$	35	30,77
6,5	$3,05 \cdot 10^4$	21	$2,31 \cdot 10^2$	35,5	29,12
7	$2,19 \cdot 10^4$	21,5	$2,10 \cdot 10^2$	36	27,58
7,5	$1,62 \cdot 10^4$	22	$1,92 \cdot 10^2$	36,5	26,14
8	$1,10 \cdot 10^4$	22,5	$1,76 \cdot 10^2$	37	24,80
8,5	$9,45 \cdot 10^3$	23	$1,61 \cdot 10^2$	37,5	23,55
9	$7,41 \cdot 10^3$	23,5	$1,48 \cdot 10^2$	38	22,37
9,5	$5,90 \cdot 10^3$	24	$1,36 \cdot 10^2$	38,5	21,27
10	$4,76 \cdot 10^3$	24,5	$1,25 \cdot 10^2$	39	20,24
10,5	$3,88 \cdot 10^3$	25	$1,15 \cdot 10^2$	39,5	19,27
11	$3,20 \cdot 10^3$	25,5	$1,07 \cdot 10^2$	40	18,35
11,5	$2,66 \cdot 10^3$	26	98,87	40,5	17,50
12	$2,23 \cdot 10^3$	26,5	91,69	41	16,69
12,5	$1,89 \cdot 10^3$	27	85,16	41,5	15,93
13	$1,61 \cdot 10^3$	27,5	79,21	42	15,22
13,5	$1,38 \cdot 10^3$	28	73,77	42,5	14,55
14	$1,19 \cdot 10^3$	28,5	68,80	43	13,91

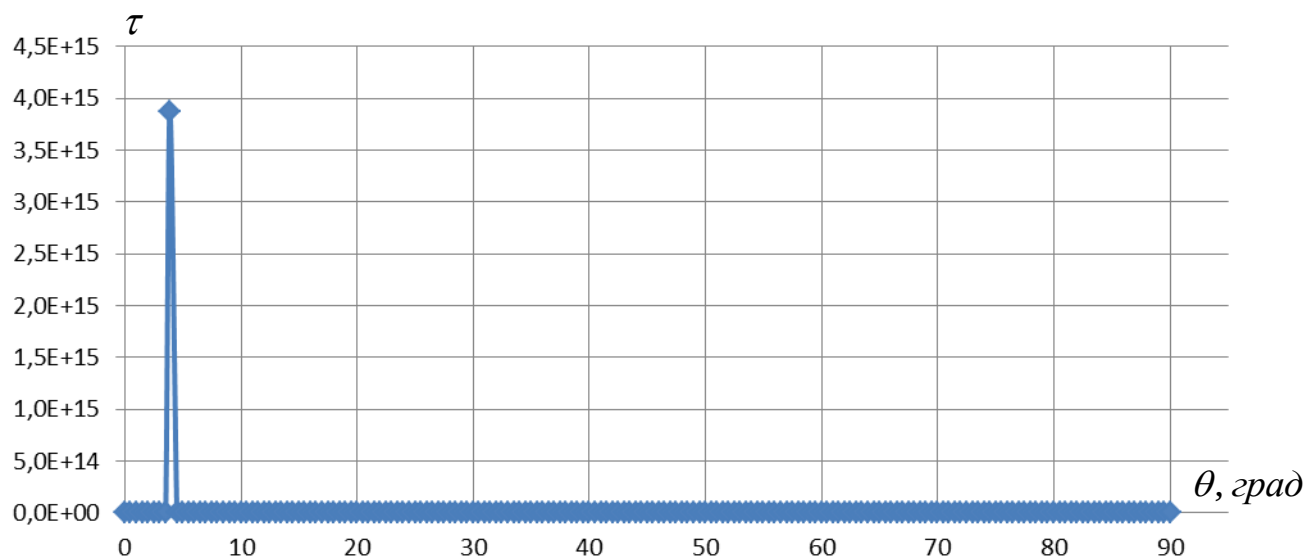
Додаток Б-12

(продовження)

$f = 750\text{Гц}$					
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
43,5	13,31	59,5	4,13	75,5	1,78
44	12,74	60	4,01	76	1,74
44,5	12,20	60,5	3,89	76,5	1,70
45	11,70	61	3,77	77	1,67
45,5	11,22	61,5	3,66	77,5	1,63
46	10,76	62	3,56	78	1,59
46,5	10,33	62,5	3,46	78,5	1,56
47	9,92	63	3,36	79	1,53
47,5	9,53	63,5	3,26	79,5	1,50
48	9,16	64	3,17	80	1,46
48,5	8,81	64,5	3,09	80,5	1,43
49	8,48	65	3,00	81	1,41
49,5	8,16	65,5	2,92	81,5	1,38
50	7,86	66	2,84	82	1,35
50,5	7,57	66,5	2,77	82,5	1,32
51	7,30	67	2,70	83	1,30
51,5	7,03	67,5	2,63	83,5	1,27
52	6,79	68	2,56	84	1,25
52,5	6,55	68,5	2,49	84,5	1,22
53	6,32	69	2,43	85	1,20
53,5	6,10	69,5	2,37	85,5	1,18
54	5,90	70	2,31	86	1,16
54,5	5,70	70,5	2,25	86,5	1,13
55	5,51	71	2,20	87	1,11
55,5	5,33	71,5	2,15	87,5	1,09
56	5,16	72	2,10	88	1,07
56,5	4,99	72,5	2,05	88,5	1,05
57	4,83	73	2,00	89	1,04
57,5	4,68	73,5	1,95	89,5	1,02
58	4,53	74	1,91	90	1,00
58,5	4,39	74,5	1,86		
59	4,26	75	1,82		

Додаток Б-12

(продовження: Залежність звукопроникності корпусу ДУСУ2 від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 750 \text{ Гц}$, $\psi = 55,8^\circ$)



Додаток Б-13

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 900 \text{ Гц}$, $\psi = 60^\circ$.

$f = 900 \text{ Гц}$					
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	$1,91 \cdot 10^5$	14,5	$1,14 \cdot 10^3$	29	65,69
0,5	$1,98 \cdot 10^5$	15	$9,85 \cdot 10^2$	29,5	61,37
1	$2,19 \cdot 10^5$	15,5	$8,57 \cdot 10^2$	30	57,40
1,5	$2,65 \cdot 10^5$	16	$7,49 \cdot 10^2$	30,5	53,75
2	$3,56 \cdot 10^5$	16,5	$6,58 \cdot 10^2$	31	50,39
2,5	$5,62 \cdot 10^5$	17	$5,80 \cdot 10^2$	31,5	47,30
3	$1,20 \cdot 10^6$	17,5	$5,14 \cdot 10^2$	32	44,44
3,5	$5,72 \cdot 10^6$	18	$4,57 \cdot 10^2$	32,5	41,80
4	$3,87 \cdot 10^{15}$	18,5	$4,08 \cdot 10^2$	33	39,35
4,5	$1,55 \cdot 10^6$	19	$3,65 \cdot 10^2$	33,5	37,09
5	$4,29 \cdot 10^5$	19,5	$3,28 \cdot 10^2$	34	34,99
5,5	$1,85 \cdot 10^5$	20	$2,96 \cdot 10^2$	34,5	33,03
6	$9,75 \cdot 10^4$	20,5	$2,67 \cdot 10^2$	35	31,22
6,5	$5,79 \cdot 10^4$	21	$2,42 \cdot 10^2$	35,5	29,53
7	$3,72 \cdot 10^4$	21,5	$2,20 \cdot 10^2$	36	27,96
7,5	$2,53 \cdot 10^4$	22	$2,00 \cdot 10^2$	36,5	26,49
8	$1,79 \cdot 10^4$	22,5	$1,83 \cdot 10^2$	37	25,12
8,5	$1,31 \cdot 10^4$	23	$1,67 \cdot 10^2$	37,5	23,84
9	$9,90 \cdot 10^3$	23,5	$1,53 \cdot 10^2$	38	22,64
9,5	$7,62 \cdot 10^3$	24	$1,41 \cdot 10^2$	38,5	21,51
10	$5,97 \cdot 10^3$	24,5	$1,29 \cdot 10^2$	39	20,46
10,5	$4,76 \cdot 10^3$	25	$1,19 \cdot 10^2$	39,5	19,47
11	$3,84 \cdot 10^3$	25,5	$1,10 \cdot 10^2$	40	18,55
11,5	$3,14 \cdot 10^3$	26	$1,02 \cdot 10^2$	40,5	17,68
12	$2,60 \cdot 10^3$	26,5	94,23	41	16,86
12,5	$2,17 \cdot 10^3$	27	87,42	41,5	16,09
13	$1,83 \cdot 10^3$	27,5	81,22	42	15,36
13,5	$1,55 \cdot 10^3$	28	75,57	42,5	14,68
14	$1,32 \cdot 10^3$	28,5	70,41	43	14,03

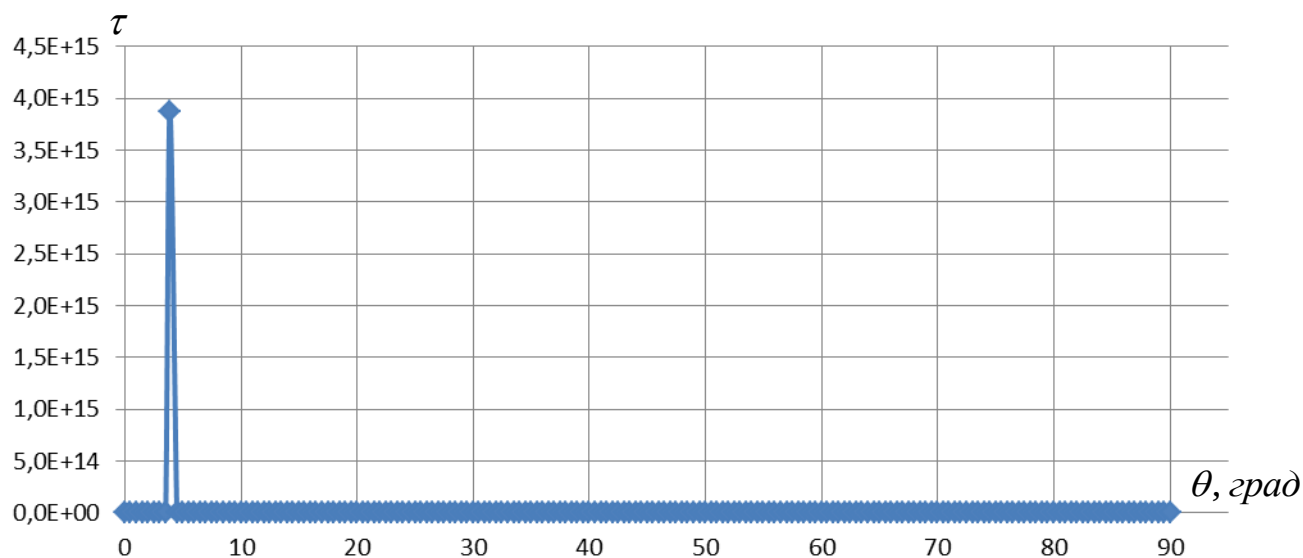
Додаток Б-13

(продовження)

$f = 900 \text{ Гц}$					
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
43,5	13,42	59,5	4,14	75,5	1,78
44	12,85	60	4,02	76	1,74
44,5	12,30	60,5	3,90	76,5	1,70
45	11,79	61	3,78	77	1,67
45,5	11,30	61,5	3,67	77,5	1,63
46	10,84	62	3,57	78	1,60
46,5	10,40	62,5	3,47	78,5	1,56
47	9,99	63	3,37	79	1,53
47,5	9,59	63,5	3,27	79,5	1,50
48	9,22	64	3,18	80	1,47
48,5	8,87	64,5	3,09	80,5	1,44
49	8,53	65	3,01	81	1,41
49,5	8,21	65,5	2,93	81,5	1,38
50	7,90	66	2,85	82	1,35
50,5	7,61	66,5	2,77	82,5	1,32
51	7,33	67	2,70	83	1,30
51,5	7,07	67,5	2,63	83,5	1,27
52	6,82	68	2,56	84	1,25
52,5	6,58	68,5	2,50	84,5	1,22
53	6,35	69	2,44	85	1,20
53,5	6,13	69,5	2,37	85,5	1,18
54	5,92	70	2,32	86	1,16
54,5	5,72	70,5	2,26	86,5	1,13
55	5,53	71	2,20	87	1,11
55,5	5,35	71,5	2,15	87,5	1,09
56	5,18	72	2,10	88	1,07
56,5	5,01	72,5	2,05	88,5	1,05
57	4,85	73	2,00	89	1,04
57,5	4,70	73,5	1,95	89,5	1,02
58	4,55	74	1,91	90	1,00
58,5	4,41	74,5	1,87		
59	4,27	75	1,82		

Додаток Б-13

(продовження: Залежність звукопроникності корпусу ДУСУ2 від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 900 \text{ Гц}$, $\psi = 60^\circ$)



Додаток Б-14

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 1400 \text{ Гц}$, $\psi = 75,3^\circ$.

$f = 1400 \text{ Гц}$					
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	$2,06 \cdot 10^5$	14,5	$1,13 \cdot 10^3$	29	65,62
0,5	$2,14 \cdot 10^5$	15	$9,80 \cdot 10^2$	29,5	61,30
1	$2,38 \cdot 10^5$	15,5	$8,53 \cdot 10^2$	30	57,34
1,5	$2,89 \cdot 10^5$	16	$7,46 \cdot 10^2$	30,5	53,70
2	$3,95 \cdot 10^5$	16,5	$6,55 \cdot 10^2$	31	50,34
2,5	$6,42 \cdot 10^5$	17	$5,78 \cdot 10^2$	31,5	47,25
3	$1,46 \cdot 10^6$	17,5	$5,12 \cdot 10^2$	32	44,40
3,5	$9,02 \cdot 10^6$	18	$4,56 \cdot 10^2$	32,5	41,76
4	$1,92 \cdot 10^{16}$	18,5	$4,07 \cdot 10^2$	33	39,32
4,5	$1,27 \cdot 10^6$	19	$3,64 \cdot 10^2$	33,5	37,06
5	$3,85 \cdot 10^5$	19,5	$3,27 \cdot 10^2$	34	34,96
5,5	$1,72 \cdot 10^5$	20	$2,95 \cdot 10^2$	34,5	33,01
6	$9,25 \cdot 10^4$	20,5	$2,66 \cdot 10^2$	35	31,20
6,5	$5,56 \cdot 10^4$	21	$2,41 \cdot 10^2$	35,5	29,51
7	$3,60 \cdot 10^4$	21,5	$2,19 \cdot 10^2$	36	27,94
7,5	$2,46 \cdot 10^4$	22	$2,00 \cdot 10^2$	36,5	26,47
8	$1,75 \cdot 10^4$	22,5	$1,82 \cdot 10^2$	37	25,10
8,5	$1,29 \cdot 10^4$	23	$1,67 \cdot 10^2$	37,5	23,82
9	$9,73 \cdot 10^3$	23,5	$1,53 \cdot 10^2$	38	22,62
9,5	$7,51 \cdot 10^3$	24	$1,40 \cdot 10^2$	38,5	21,50
10	$5,90 \cdot 10^3$	24,5	$1,29 \cdot 10^2$	39	20,45
10,5	$4,70 \cdot 10^3$	25	$1,19 \cdot 10^2$	39,5	19,46
11	$3,81 \cdot 10^3$	25,5	$1,10 \cdot 10^2$	40	18,54
11,5	$3,12 \cdot 10^3$	26	$1,02 \cdot 10^2$	40,5	17,67
12	$2,58 \cdot 10^3$	26,5	94,09	41	16,85
12,5	$2,15 \cdot 10^3$	27	87,30	41,5	16,08
13	$1,81 \cdot 10^3$	27,5	81,12	42	15,35
13,5	$1,54 \cdot 10^3$	28	75,48	42,5	14,67
14	$1,32 \cdot 10^3$	28,5	70,33	43	14,03

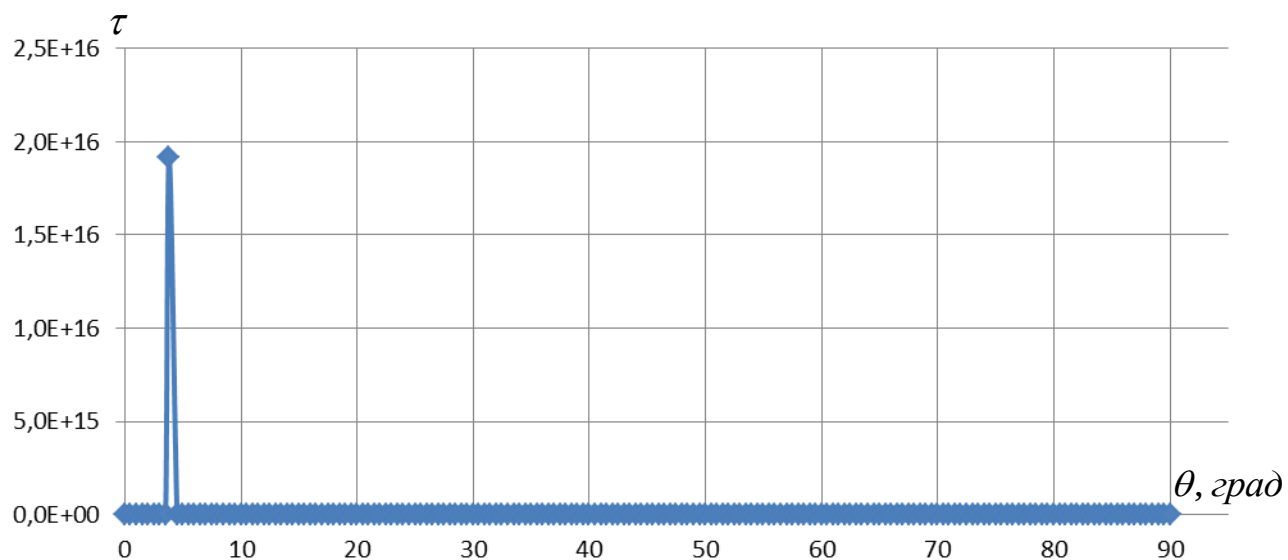
Додаток Б-14

(продовження)

$f = 1400 \text{ Гц}$					
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
43,5	13,42	59,5	4,14	75,5	1,78
44	12,84	60	4,02	76	1,74
44,5	12,30	60,5	3,90	76,5	1,70
45	11,78	61	3,78	77	1,67
45,5	11,30	61,5	3,67	77,5	1,63
46	10,84	62	3,57	78	1,60
46,5	10,40	62,5	3,47	78,5	1,56
47	9,98	63	3,37	79	1,53
47,5	9,59	63,5	3,27	79,5	1,50
48	9,22	64	3,18	80	1,47
48,5	8,86	64,5	3,09	80,5	1,44
49	8,53	65	3,01	81	1,41
49,5	8,21	65,5	2,93	81,5	1,38
50	7,90	66	2,85	82	1,35
50,5	7,61	66,5	2,77	82,5	1,32
51	7,33	67	2,70	83	1,30
51,5	7,07	67,5	2,63	83,5	1,27
52	6,82	68	2,56	84	1,25
52,5	6,58	68,5	2,50	84,5	1,22
53	6,35	69	2,44	85	1,20
53,5	6,13	69,5	2,37	85,5	1,18
54	5,92	70	2,32	86	1,16
54,5	5,72	70,5	2,26	86,5	1,13
55	5,53	71	2,20	87	1,11
55,5	5,35	71,5	2,15	87,5	1,09
56	5,18	72	2,10	88	1,07
56,5	5,01	72,5	2,05	88,5	1,05
57	4,85	73	2,00	89	1,04
57,5	4,70	73,5	1,95	89,5	1,02
58	4,55	74	1,91	90	1,00
58,5	4,41	74,5	1,87		
59	4,27	75	1,82		

Додаток Б-14

(продовження: Залежність звукопроникності корпусу ДУСУ2 від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 1400 \text{ Гц}$, $\psi = 75,3^\circ$)



Додаток Б-15

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 47000 \text{ Гц}$, $\psi = 45^\circ$.

$f = 47000 \text{ Гц}$					
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	0,928	14,5	0,954	29	1,347
0,5	0,928	15	0,958	29,5	1,380
1	0,928	15,5	0,962	30	1,415
1,5	0,928	16	0,967	30,5	1,453
2	0,928	16,5	0,972	31	1,493
2,5	0,928	17	0,977	31,5	1,537
3	0,928	17,5	0,983	32	1,583
3,5	0,928	18	0,989	32,5	1,634
4	0,928	18,5	0,996	33	1,688
4,5	0,928	19	1,003	33,5	1,746
5	0,928	19,5	1,011	34	1,809
5,5	0,928	20	1,020	34,5	1,877
6	0,929	20,5	1,029	35	1,950
6,5	0,929	21	1,039	35,5	2,029
7	0,929	21,5	1,050	36	2,115
7,5	0,930	22	1,061	36,5	2,208
8	0,931	22,5	1,074	37	2,309
8,5	0,931	23	1,087	37,5	2,419
9	0,932	23,5	1,102	38	2,538
9,5	0,933	24	1,117	38,5	2,669
10	0,934	24,5	1,134	39	2,812
10,5	0,936	25	1,151	39,5	2,968
11	0,937	25,5	1,170	40	3,140
11,5	0,939	26	1,191	40,5	3,328
12	0,941	26,5	1,212	41	3,536
12,5	0,943	27	1,236	41,5	3,766
13	0,945	27,5	1,261	42	4,020
13,5	0,948	28	1,287	42,5	4,302
14	0,951	28,5	1,316	43	4,616

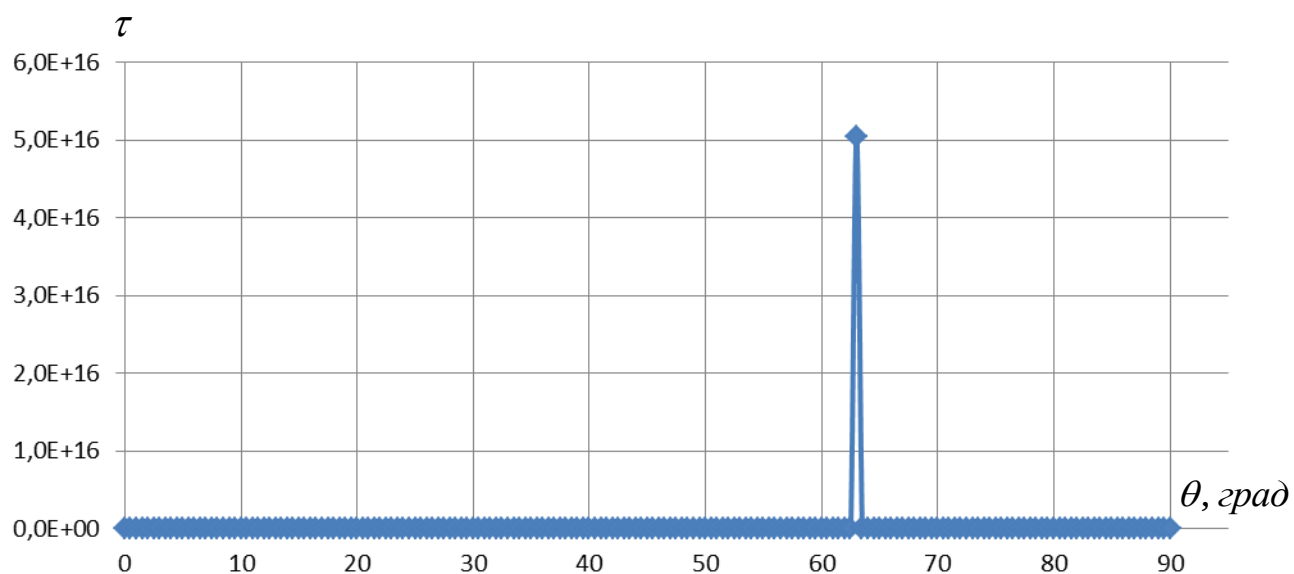
Додаток Б-15

(продовження)

$f = 47000 Гц$					
$\theta, град$	τ	$\theta, град$	τ	$\theta, град$	τ
43,5	4,966	59,5	$1,63 \cdot 10^3$	75,5	19,330
44	5,359	60	$2,73 \cdot 10^3$	76	16,415
44,5	5,799	60,5	$5,00 \cdot 10^3$	76,5	14,038
45	6,296	61	$1,03 \cdot 10^4$	77	12,084
45,5	6,858	61,5	$2,53 \cdot 10^4$	77,5	10,465
46	7,495	62	$8,41 \cdot 10^4$	78	9,114
46,5	8,221	62,5	$5,51 \cdot 10^5$	78,5	7,980
47	9,053	63	$5,04 \cdot 10^{16}$	79	7,022
47,5	10,008	63,5	$2,91 \cdot 10^6$	79,5	6,208
48	11,112	64	$6,41 \cdot 10^6$	80	5,513
48,5	12,393	64,5	$2,97 \cdot 10^6$	80,5	4,916
49	13,888	65	$1,81 \cdot 10^5$	81	4,401
49,5	15,644	65,5	$4,13 \cdot 10^4$	81,5	3,955
50	17,717	66	$1,45 \cdot 10^4$	82	3,567
50,5	20,183	66,5	$6,41 \cdot 10^3$	82,5	3,228
51	23,136	67	$3,27 \cdot 10^3$	83	2,931
51,5	26,700	67,5	$1,84 \cdot 10^3$	83,5	2,669
52	31,038	68	$1,11 \cdot 10^3$	84	2,438
52,5	36,366	68,5	$7,12 \cdot 10^2$	84,5	2,234
53	42,976	69	$4,77 \cdot 10^2$	85	2,052
53,5	51,266	69,5	$3,32 \cdot 10^2$	85,5	1,890
54	61,786	70	$2,38 \cdot 10^2$	86	1,745
54,5	75,317	70,5	$1,75 \cdot 10^2$	86,5	1,615
55	92,976	71	$1,31 \cdot 10^2$	87	1,498
55,5	$1,16 \cdot 10^2$	71,5	$1,01 \cdot 10^2$	87,5	1,393
56	$1,48 \cdot 10^2$	72	78,444	88	1,299
56,5	$1,92 \cdot 10^2$	72,5	62,062	88,5	1,213
57	$2,54 \cdot 10^2$	73	49,761	89	1,135
57,5	$3,43 \cdot 10^2$	73,5	40,379	89,5	1,064
58	$4,78 \cdot 10^2$	74	33,122	90	1,000
58,5	$6,88 \cdot 10^2$	74,5	27,439		
59	$1,03 \cdot 10^3$	75	22,935		

Додаток Б-15

(продовження: Залежність звукопроникності корпусу ДУСУ2 від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 47000 \text{ Гц}$, $\psi = 45^\circ$)



Додаток Б-16

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 53000 \text{ Гц}$, $\psi = 41,8^\circ$.

$f = 53000 \text{ Гц}$					
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	0,912	14,5	0,950	29	1,584
0,5	0,912	15	0,955	29,5	1,644
1	0,913	15,5	0,961	30	1,711
1,5	0,913	16	0,967	30,5	1,783
2	0,913	16,5	0,974	31	1,863
2,5	0,913	17	0,982	31,5	1,951
3	0,913	17,5	0,990	32	2,048
3,5	0,913	18	0,999	32,5	2,155
4	0,913	18,5	1,009	33	2,275
4,5	0,913	19	1,020	33,5	2,407
5	0,913	19,5	1,032	34	2,556
5,5	0,914	20	1,044	34,5	2,722
6	0,914	20,5	1,058	35	2,909
6,5	0,914	21	1,073	35,5	3,120
7	0,915	21,5	1,090	36	3,360
7,5	0,916	22	1,107	36,5	3,634
8	0,917	22,5	1,126	37	3,948
8,5	0,918	23	1,147	37,5	4,311
9	0,919	23,5	1,169	38	4,732
9,5	0,920	24	1,194	38,5	5,226
10	0,922	24,5	1,220	39	5,809
10,5	0,924	25	1,248	39,5	6,503
11	0,926	25,5	1,279	40	7,339
11,5	0,928	26	1,312	40,5	8,358
12	0,931	26,5	1,349	41	9,615
12,5	0,934	27	1,388	41,5	11,190
13	0,937	27,5	1,431	42	13,200
13,5	0,941	28	1,478	42,5	15,817
14	0,945	28,5	1,528	43	19,311

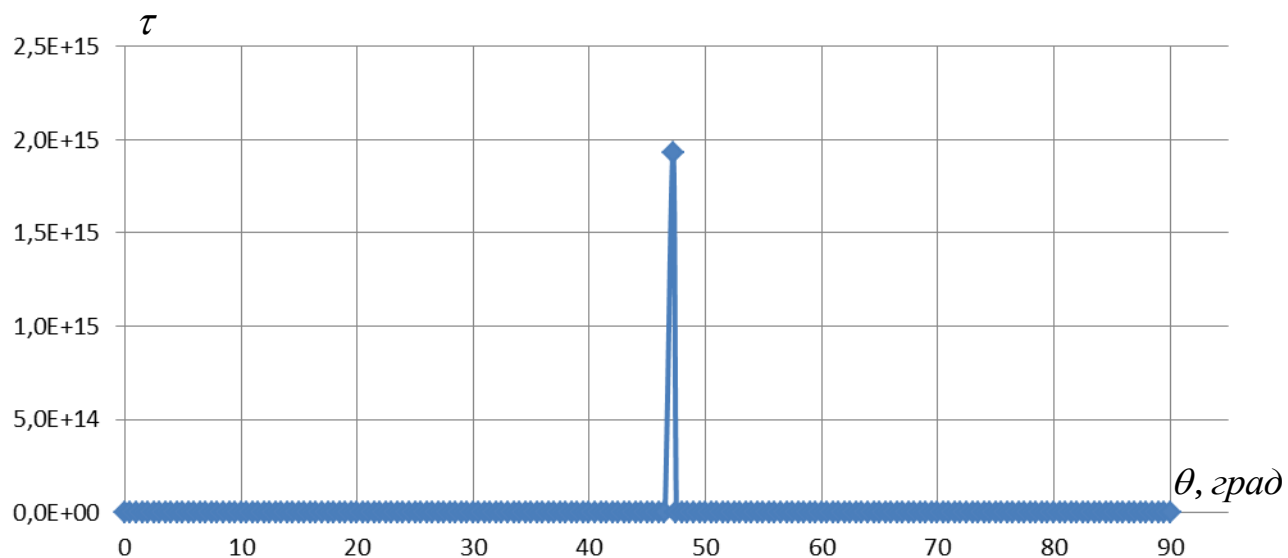
Додаток Б-16

(продовження)

$f = 53000 Гц$					
$\theta, град$	τ	$\theta, град$	τ	$\theta, град$	τ
43,5	24,117	59,5	6,173	75,5	82,914
44	30,976	60	5,933	76	$1,49 \cdot 10^2$
44,5	41,236	60,5	5,733	76,5	$3,54 \cdot 10^2$
45	57,556	61	5,570	77	$1,85 \cdot 10^3$
45,5	85,790	61,5	5,439	77,5	$1,75 \cdot 10^4$
46	$1,41 \cdot 10^2$	62	5,339	78	$6,46 \cdot 10^2$
46,5	$2,72 \cdot 10^2$	62,5	5,266	78,5	$1,93 \cdot 10^2$
47	$7,25 \cdot 10^2$	63	5,222	79	89,630
47,5	$1,23 \cdot 10^{15}$	63,5	5,203	79,5	50,965
48	$1,18 \cdot 10^4$	64	5,211	80	32,520
48,5	$9,78 \cdot 10^2$	64,5	5,246	80,5	22,368
49	$3,37 \cdot 10^2$	65	5,309	81	16,221
49,5	$1,70 \cdot 10^2$	65,5	5,402	81,5	12,237
50	$1,03 \cdot 10^2$	66	5,527	82	9,517
50,5	69,552	66,5	5,689	82,5	7,585
51	50,358	67	5,891	83	6,168
51,5	38,353	67,5	6,139	83,5	5,100
52	30,343	68	6,442	84	4,277
52,5	24,731	68,5	6,810	84,5	3,632
53	20,646	69	7,257	85	3,117
53,5	17,582	69,5	7,801	85,5	2,700
54	15,226	70	8,466	86	2,359
54,5	13,377	70,5	9,286	86,5	2,077
55	11,901	71	10,309	87	1,841
55,5	10,706	71,5	11,602	87,5	1,642
56	9,727	72	13,267	88	1,472
56,5	8,918	72,5	15,456	88,5	1,327
57	8,243	73	18,414	89	1,203
57,5	7,678	73,5	22,550	89,5	1,094
58	7,201	74	28,590	90	1,000
58,5	6,799	74,5	37,935		
59	6,459	75	53,575		

Додаток Б-16

(продовження: Залежність звукопроникності корпусу ДУСУ2 від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 53000 \text{ Гц}$, $\psi = 41,8^\circ$)



Додаток Б-17

Величина звукопроникності корпусу ДУСУ2 в залежності від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 53500 \text{ Гц}$, $\psi = 40,1^\circ$.

$f = 53500 \text{ Гц}$					
$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ	$\theta, \text{град}$	τ
0	0,910	14,5	0,949	29	1,607
0,5	0,910	15	0,954	29,5	1,671
1	0,910	15,5	0,960	30	1,741
1,5	0,910	16	0,966	30,5	1,818
2	0,910	16,5	0,974	31	1,903
2,5	0,910	17	0,981	31,5	1,996
3	0,910	17,5	0,990	32	2,100
3,5	0,910	18	0,999	32,5	2,214
4	0,911	18,5	1,010	33	2,342
4,5	0,911	19	1,021	33,5	2,485
5	0,911	19,5	1,033	34	2,646
5,5	0,911	20	1,046	34,5	2,826
6	0,912	20,5	1,060	35	3,030
6,5	0,912	21	1,076	35,5	3,262
7	0,913	21,5	1,092	36	3,526
7,5	0,914	22	1,111	36,5	3,830
8	0,914	22,5	1,130	37	4,181
8,5	0,915	23	1,152	37,5	4,589
9	0,917	23,5	1,175	38	5,067
9,5	0,918	24	1,200	38,5	5,633
10	0,920	24,5	1,227	39	6,308
10,5	0,922	25	1,257	39,5	7,121
11	0,924	25,5	1,289	40	8,113
11,5	0,926	26	1,324	40,5	9,341
12	0,929	26,5	1,361	41	10,883
12,5	0,932	27	1,402	41,5	12,857
13	0,936	27,5	1,447	42	15,437
13,5	0,940	28	1,496	42,5	18,897
14	0,944	28,5	1,549	43	23,686

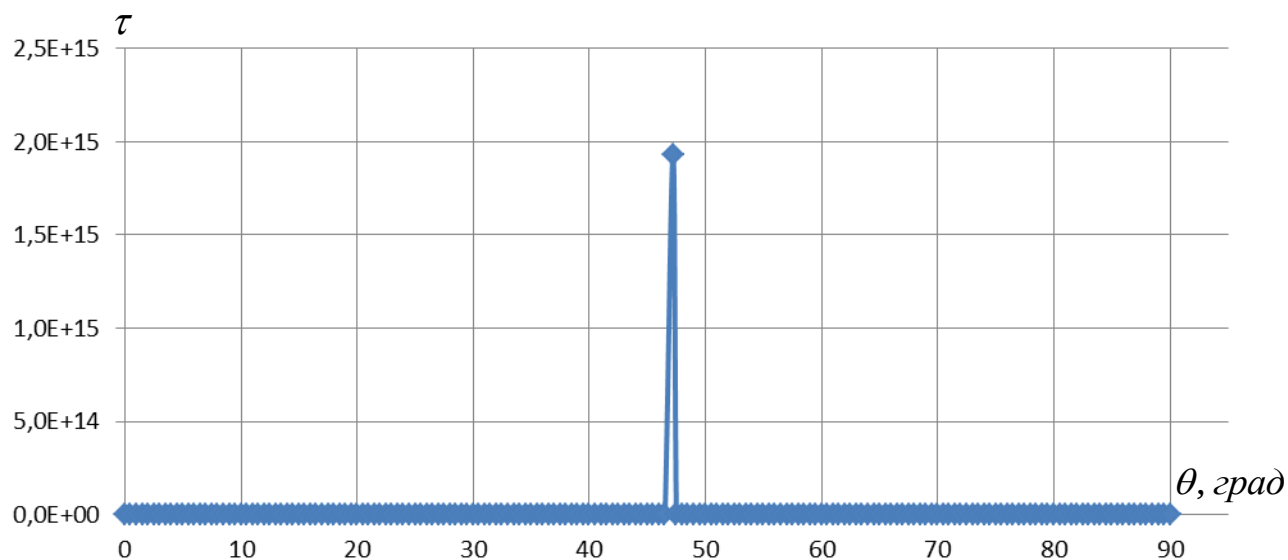
Додаток Б-17

(продовження)

$f = 53500 Гц$					
$\theta, град$	τ	$\theta, град$	τ	$\theta, град$	τ
43,5	30,572	59,5	5,105	75,5	49,920
44	40,976	60	4,919	76	78,456
44,5	57,754	60,5	4,764	76,5	$1,44 \cdot 10^2$
45	87,362	61	4,636	77	$3,63 \cdot 10^2$
45,5	$1,47 \cdot 10^2$	61,5	4,534	77,5	$2,31 \cdot 10^3$
46	$2,97 \cdot 10^2$	62	4,456	78	$7,07 \cdot 10^3$
46,5	$8,79 \cdot 10^2$	62,5	4,399	78,5	$4,83 \cdot 10^2$
47	$1,93 \cdot 10^{15}$	63	4,364	79	$1,56 \cdot 10^2$
47,5	$4,87 \cdot 10^3$	63,5	4,349	79,5	74,957
48	$6,91 \cdot 10^2$	64	4,356	80	43,401
48,5	$2,65 \cdot 10^2$	64,5	4,383	80,5	28,023
49	$1,40 \cdot 10^2$	65	4,433	81	19,440
49,5	86,645	65,5	4,505	81,5	14,190
50	59,285	66	4,603	82	10,761
50,5	43,328	66,5	4,729	82,5	8,407
51	33,209	67	4,887	83	6,726
51,5	26,387	67,5	5,079	83,5	5,487
52	21,570	68	5,313	84	4,551
52,5	18,044	68,5	5,596	84,5	3,827
53	15,384	69	5,937	85	3,258
53,5	13,331	69,5	6,350	85,5	2,802
54	11,714	70	6,850	86	2,433
54,5	10,418	70,5	7,460	86,5	2,130
55	9,367	71	8,213	87	1,879
55,5	8,503	71,5	9,152	87,5	1,668
56	7,786	72	10,341	88	1,490
56,5	7,187	72,5	11,874	88,5	1,339
57	6,683	73	13,895	89	1,209
57,5	6,256	73,5	16,635	89,5	1,097
58	5,895	74	20,485	90	1,000
58,5	5,587	74,5	26,144		
59	5,326	75	34,971		

Додаток Б-17

(продовження: Залежність звукопроникності корпусу ДУСУ2 від кута співпадання θ за умови формування комбінованого резонансу, частота акустичного випромінювання $f = 53500 \text{ Гц}$, $\psi = 40,1^\circ$)



Додаток В-1

Зовнішній вигляд експериментального стенду для проведення напівнатурних досліджень промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2.



Додаток В-2

Напівнатурні випробування промислового зразка гіроскопічного приладу
класу ДУСУ2-30В в полі дії акустичного випромінювання: $\varphi = 0^\circ$, без
буферної зони.

Час, с	Вихідна величина, $град \cdot c^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $град \cdot c^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $град \cdot c^{-1}$
0,5	0,0046	14	0,0529	27,5	0,06164
1	0,03772	14,5	0,05796	28	0,06049
1,5	0,03933	15	0,06302	28,5	0,05934
2	-0,00391	15,5	0,0598	29	0,06118
2,5	0,03358	16	0,05221	29,5	0,06095
3	0,18515	16,5	0,0529	30	0,05911
3,5	0,23437	17	0,05658	30,5	0,06164
4	0,2553	17,5	0,05957	31	0,06072
4,5	0,05382	18	0,05888	31,5	0,05888
5	0,0391	18,5	0,06141	32	0,06095
5,5	0,09867	19	0,06118	32,5	0,06072
6	0,06003	19,5	0,05934	33	0,05842
6,5	0,1081	20	0,06026	33,5	0,06118
7	0,03082	20,5	0,06072	34	0,06003
7,5	0,07728	21	0,0598	34,5	0,05888
8	0,16307	21,5	0,06164	35	0,06072
8,5	0,03841	22	0,06118	35,5	0,06026
9	0,06072	22,5	0,05934	36	0,05865
9,5	0,05428	23	0,06141	36,5	0,06072
10	0,05681	23,5	0,06095	37	0,05957
10,5	0,05842	24	0,05888	37,5	0,0575
11	0,05313	24,5	0,0621	38	0,06072
11,5	0,05244	25	0,06072	38,5	0,05911
12	0,05842	25,5	0,05957	39	0,05796
12,5	0,06118	26	0,06118	39,5	0,0598
13	0,05267	26,5	0,06072	40	0,05704
13,5	0,05589	27	0,05888		

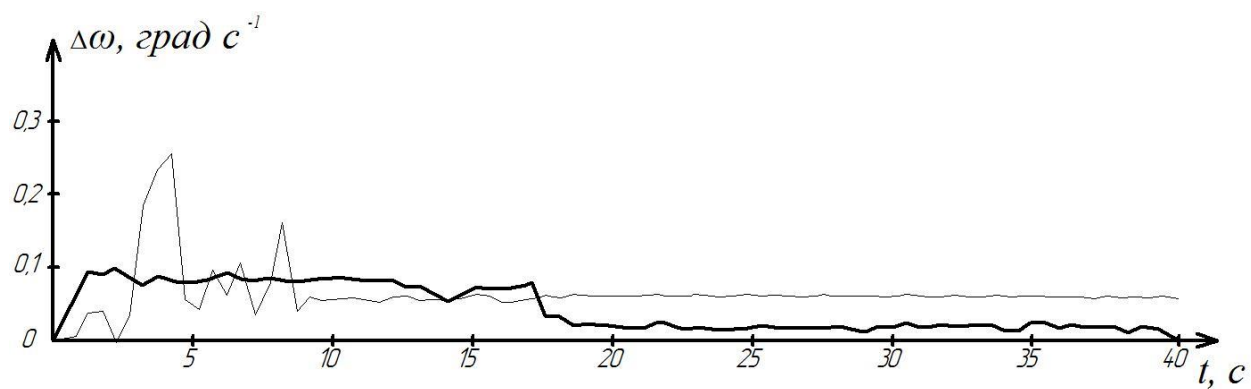
Додаток В-2

(продовження: $\varphi = 0^\circ$, з буферною зоною)

Час, с	Вихідна величина, $град \cdot c^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $град \cdot c^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $град \cdot c^{-1}$
0,5	-0,04094	14	-0,05129	27,5	-0,01541
1	-0,09315	14,5	-0,06279	28	-0,01702
1,5	-0,08947	15	-0,07199	28,5	-0,01587
2	-0,09913	15,5	-0,06877	29	-0,01196
2,5	-0,08303	16	-0,06923	29,5	-0,01725
3	-0,07452	16,5	-0,0713	30	-0,01633
3,5	-0,08809	17	-0,07498	30,5	-0,02139
4	-0,08073	17,5	-0,03151	31	-0,01518
4,5	-0,07682	18	-0,03105	31,5	-0,01725
5	-0,08073	18,5	-0,01886	32	-0,01955
5,5	-0,08257	19	-0,02116	32,5	-0,01771
6	-0,09062	19,5	-0,01955	33	-0,0207
6,5	-0,08326	20	-0,01748	33,5	-0,02001
7	-0,07981	20,5	-0,01541	34	-0,01426
7,5	-0,08349	21	-0,01541	34,5	-0,01173
8	-0,08349	21,5	-0,02277	35	-0,02139
8,5	-0,07866	22	-0,01955	35,5	-0,02139
9	-0,08027	22,5	-0,0138	36	-0,01564
9,5	-0,08303	23	-0,01564	36,5	-0,02047
10	-0,08556	23,5	-0,01288	37	-0,0184
10,5	-0,08188	24	-0,01334	37,5	-0,01472
11	-0,08027	24,5	-0,01403	38	-0,01564
11,5	-0,08119	25	-0,01725	38,5	-0,00943
12	-0,08004	25,5	-0,01794	39	-0,01886
12,5	-0,07107	26	-0,01656	39,5	-0,01472
13	-0,07153	26,5	-0,01495	40	-0,00736
13,5	-0,06233	27	-0,0161		

Додаток В-2

(продовження: $\varphi = 0^\circ$, тонка лінія – без буферної зони, контурна лінія – з буферною зоною)



Додаток В-3

Напівнатурні випробування промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2-30В в полі дії акустичного випромінювання: $\varphi = 45^\circ$, без буферної зони.

Час, с	Вихідна величина, град·с ⁻¹	Час, с	Вихідна величина, град с ⁻¹	Час, с	Вихідна величина, град с ⁻¹
0,5	0,0115	14	0,27025	27,5	0,17135
1	0,05911	14,5	0,29325	28	0,33005
1,5	0,01058	15	0,20815	28,5	0,30705
2	0,07797	15,5	0,16215	29	0,19665
2,5	0,1357	16	0,29325	29,5	0,11845
3	0,25944	16,5	0,14605	30	0,34615
3,5	0,34201	17	0,17365	30,5	0,25415
4	0,21758	17,5	0,32085	31	0,12995
4,5	0,23184	18	0,24495	31,5	0,37145
5	0,16836	18,5	0,28175	32	0,23805
5,5	0,31349	19	0,13455	32,5	0,23345
6	0,32338	19,5	0,36915	33	0,22195
6,5	0,28865	20	0,35765	33,5	0,22195
7	0,23805	20,5	0,12995	34	0,35075
7,5	0,24035	21	0,25645	34,5	0,18515
8	0,24035	21,5	0,33925	35	0,25875
8,5	0,13685	22	0,34845	35,5	0,32775
9	0,22425	22,5	0,20585	36	0,27255
9,5	0,16215	23	0,33925	36,5	0,25415
10	0,27715	23,5	0,23345	37	0,15525
10,5	0,23345	24	0,28635	37,5	0,14145
11	0,30245	24,5	0,12765	38	0,24725
11,5	0,11845	25	0,21275	38,5	0,18055
12	0,25415	25,5	0,38525	39	0,10925
12,5	0,34845	26	0,20815	39,5	0,35535
13	0,30245	26,5	0,30935	40	0,24265
13,5	0,20355	27	0,29555		

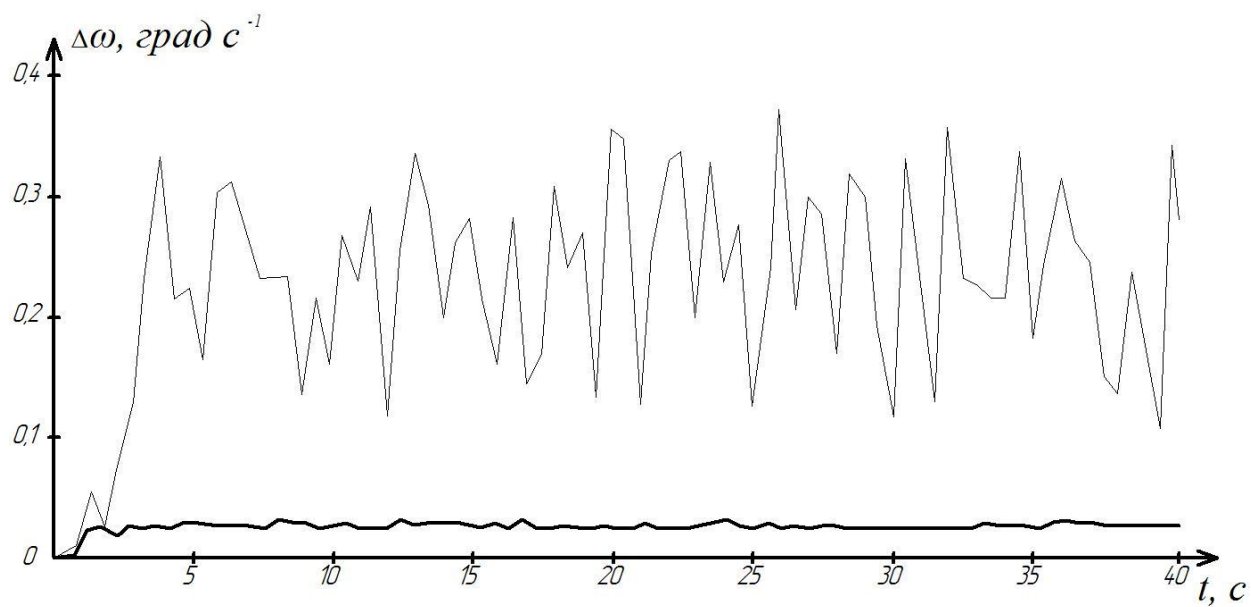
Додаток В-3

(продовження: $\varphi = 45^\circ$, з буферною зоною)

Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$
0,5	0,0023	14	0,02806	27,5	0,023
1	0,02208	14,5	0,02829	28	0,02553
1,5	0,02461	15	0,02576	28,5	0,0253
2	0,01748	15,5	0,02369	29	0,02323
2,5	0,02576	16	0,02806	29,5	0,023
3	0,02323	16,5	0,02323	30	0,02346
3,5	0,02599	17	0,03036	30,5	0,02323
4	0,02323	17,5	0,02323	31	0,023
4,5	0,02829	18	0,02369	31,5	0,02323
5	0,02783	18,5	0,02553	32	0,02323
5,5	0,02599	19	0,02369	32,5	0,02346
6	0,02576	19,5	0,02346	33	0,02323
6,5	0,02576	20	0,02599	33,5	0,02346
7	0,02576	20,5	0,02346	34	0,02806
7,5	0,02346	21	0,02346	34,5	0,0253
8	0,03059	21,5	0,02806	35	0,0253
8,5	0,02806	22	0,02323	35,5	0,02553
9	0,02783	22,5	0,02369	36	0,02323
9,5	0,02346	23	0,02369	36,5	0,02806
10	0,02553	23,5	0,02553	37	0,0299
10,5	0,02806	24	0,02806	37,5	0,02783
11	0,02346	24,5	0,03036	38	0,0276
11,5	0,02323	25	0,02553	38,5	0,0253
12	0,02346	25,5	0,02346	39	0,02576
12,5	0,03036	26	0,02806	39,5	0,02553
13	0,02576	26,5	0,02323	40	0,0253
13,5	0,02783	27	0,02576		

Додаток В-3

(продовження: $\varphi = 45^\circ$, тонка лінія – без буферної зони, контурна лінія – з буферною зоною)



Додаток В-4

Напівнатурні випробування промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2-30В в полі дії акустичного випромінювання: $\varphi = 90^\circ$, без буферної зони.

Час, с	Вихідна величина, град·с ⁻¹	Час, с	Вихідна величина, град с ⁻¹	Час, с	Вихідна величина, град с ⁻¹
0,5	0,00069	14	0,00368	27,5	0,00345
1	0,00138	14,5	0,00345	28	0,00299
1,5	0,046	15	0,00368	28,5	0,00345
2	0,22379	15,5	0,00322	29	0,00322
2,5	0,35374	16	0,00368	29,5	0,00322
3	0,36616	16,5	0,00368	30	0,00322
3,5	0,38088	17	0,00345	30,5	0,00299
4	0,33212	17,5	0,00391	31	0,00322
4,5	0,31119	18	0,00322	31,5	0,00276
5	0,05428	18,5	0,00391	32	0,00322
5,5	0,0069	19	0,00299	32,5	0,00276
6	0,0046	19,5	0,00368	33	0,00299
6,5	0,24449	20	0,00345	33,5	0,00276
7	0,01058	20,5	0,00322	34	0,00391
7,5	0,00391	21	0,00368	34,5	0,00322
8	0,00345	21,5	0,00322	35	0,00299
8,5	0,00391	22	0,00345	35,5	0,00391
9	0,00345	22,5	0,00322	36	0,00368
9,5	0,00391	23	0,00368	36,5	0,00322
10	0,00322	23,5	0,00299	37	0,00299
10,5	0,00391	24	0,00345	37,5	0,00391
11	0,00345	24,5	0,00322	38	0,00368
11,5	0,00368	25	0,00322	38,5	0,00276
12	0,00368	25,5	0,00368	39	0,00322
12,5	0,00345	26	0,00322	39,5	0,00299
13	0,00368	26,5	0,00345	40	0,00368
13,5	0,00322	27	0,00299		

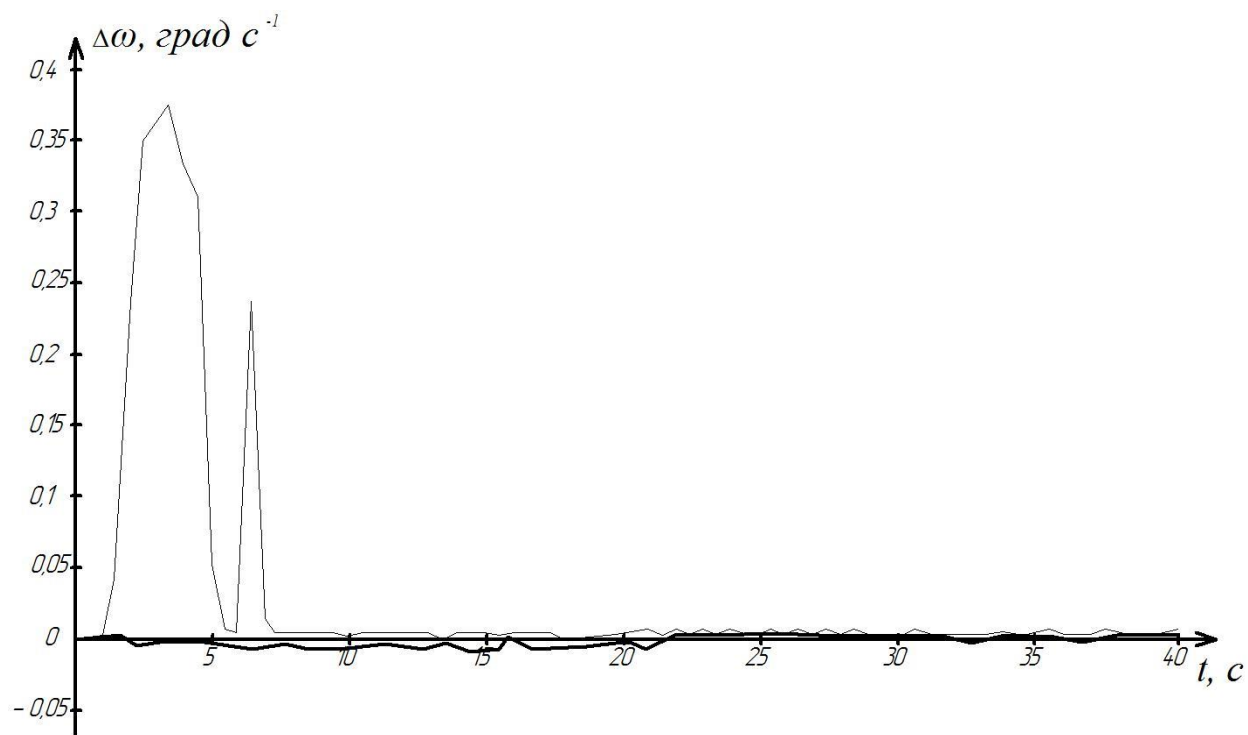
Додаток В-4

(продовження: $\varphi = 90^\circ$, з буферною зоною)

Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$
0,5	0,00023	14	-0,00368	27,5	0,00092
1	0,00046	14,5	-0,00437	28	0,00069
1,5	0	15	0,00069	28,5	0,00046
2	-0,00391	15,5	-0,00184	29	0,00069
2,5	-0,00345	16	-0,00414	29,5	0,00092
3	-0,00161	16,5	-0,00368	30	0,00023
3,5	-0,00207	17	-0,0046	30,5	0
4	-0,00138	17,5	-0,00368	31	0,00023
4,5	-0,00506	18	-0,00529	31,5	-0,00115
5	-0,00552	18,5	-0,00207	32	0
5,5	-0,0046	19	-0,00552	32,5	0,00023
6	-0,00414	19,5	-0,00322	33	0,00092
6,5	-0,0023	20	-0,00552	33,5	0,00069
7	-0,00138	20,5	-0,00161	34	0,00046
7,5	-0,00276	21	0	34,5	0,00023
8	-0,00506	21,5	0,00069	35	0
8,5	-0,00345	22	0,00069	35,5	-0,00023
9	-0,00483	22,5	0,00092	36	0,00046
9,5	-0,00276	23	0,00069	36,5	0,00092
10	-0,00253	23,5	0,00092	37	0,00046
10,5	-0,00276	24	0,00092	37,5	0,00092
11	-0,0023	24,5	0,00046	38	0,00046
11,5	-0,00253	25	0,00092	38,5	0,00069
12	-0,00414	25,5	0,00069	39	0,00046
12,5	-0,00345	26	0,00092	39,5	0,00023
13	-0,00322	26,5	0,00069	40	0
13,5	-0,0046	27	0,00069		

Додаток В-4

(продовження: $\varphi = 90^\circ$, тонка лінія – без буферної зони, контурна лінія – з буферною зоною)



Додаток В-5

Напівнатурні випробування промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2-30В в полі дії акустичного випромінювання: $\varphi = 135^\circ$, без буферної зони.

Час, с	Вихідна величина, град·с ⁻¹	Час, с	Вихідна величина, град с ⁻¹	Час, с	Вихідна величина, град с ⁻¹
0,5	0	14	-0,10994	27,5	-0,10672
1	-0,06624	14,5	-0,10764	28	-0,09269
1,5	-0,0874	15	-0,10603	28,5	-0,09936
2	-0,07544	15,5	-0,10718	29	-0,09568
2,5	-0,08579	16	-0,10488	29,5	-0,09499
3	-0,09545	16,5	-0,1012	30	-0,094
3,5	-0,09591	17	-0,10603	30,5	-0,09108
4	-0,09568	17,5	-0,10419	31	-0,08464
4,5	-0,09637	18	-0,1081	31,5	-0,08625
5	-0,09338	18,5	-0,1104	32	-0,08096
5,5	-0,09936	19	-0,10258	32,5	-0,06026
6	-0,10005	19,5	-0,10879	33	-0,0736
6,5	-0,10948	20	-0,09867	33,5	-0,08326
7	-0,10603	20,5	-0,09246	34	-0,07222
7,5	-0,11109	21	-0,0943	34,5	-0,06992
8	-0,11615	21,5	-0,08326	35	-0,06394
8,5	-0,10649	22	-0,10281	35,5	-0,08464
9	-0,10626	22,5	-0,09683	36	-0,06003
9,5	-0,10212	23	-0,09798	36,5	-0,07498
10	-0,10511	23,5	-0,09959	37	-0,09223
10,5	-0,10212	24	-0,10028	37,5	-0,09499
11	-0,09729	24,5	-0,0989	38	-0,07521
11,5	-0,10718	25	-0,09246	38,5	-0,09269
12	-0,1081	25,5	-0,1012	39	-0,11546
12,5	-0,10994	26	-0,09108	39,5	-0,06141
13	-0,10465	26,5	-0,08372	40	-0,09223
13,5	-0,10327	27	-0,09177		

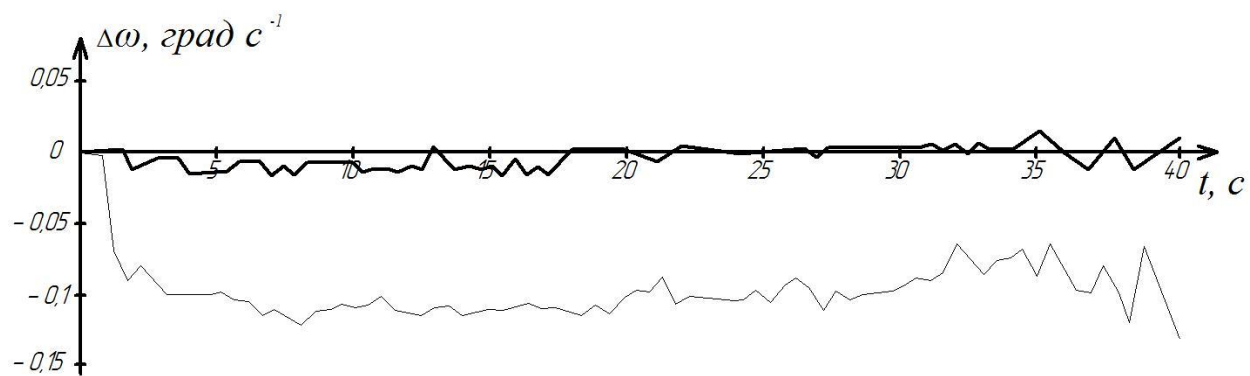
Додаток В-5

(продовження: $\varphi = 135^\circ$, з буферною зоною)

Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$
0,5	-0,03611	14	-0,10994	27,5	-0,10672
1	-0,06624	14,5	-0,10764	28	-0,09269
1,5	-0,0874	15	-0,10603	28,5	-0,09936
2	-0,07544	15,5	-0,10718	29	-0,09568
2,5	-0,08579	16	-0,10488	29,5	-0,09499
3	-0,09545	16,5	-0,1012	30	-0,094
3,5	-0,09591	17	-0,10603	30,5	-0,09108
4	-0,09568	17,5	-0,10419	31	-0,08464
4,5	-0,09637	18	-0,1081	31,5	-0,08625
5	-0,09338	18,5	-0,1104	32	-0,08096
5,5	-0,09936	19	-0,10258	32,5	-0,06026
6	-0,10005	19,5	-0,10879	33	-0,0736
6,5	-0,10948	20	-0,09867	33,5	-0,08326
7	-0,10603	20,5	-0,09246	34	-0,07222
7,5	-0,11109	21	-0,0943	34,5	-0,06992
8	-0,11615	21,5	-0,08326	35	-0,06394
8,5	-0,10649	22	-0,10281	35,5	-0,08464
9	-0,10626	22,5	-0,09683	36	-0,06003
9,5	-0,10212	23	-0,09798	36,5	-0,07498
10	-0,10511	23,5	-0,09959	37	-0,09223
10,5	-0,10212	24	-0,10028	37,5	-0,09499
11	-0,09729	24,5	-0,0989	38	-0,07521
11,5	-0,10718	25	-0,09246	38,5	-0,09269
12	-0,1081	25,5	-0,1012	39	-0,11546
12,5	-0,10994	26	-0,09108	39,5	-0,06141
13	-0,10465	26,5	-0,08372	40	-0,09223
13,5	-0,10327	27	-0,09177		

Додаток В-5

(продовження: $\varphi = 135^\circ$, тонка лінія – без буферної зони, контурна лінія – з буферною зоною)



Додаток В-6

Напівнатурні випробування промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2-30В в полі дії акустичного випромінювання: $\varphi = 180^\circ$, без буферної зони.

Час, с	Вихідна величина, град·с ⁻¹	Час, с	Вихідна величина, град с ⁻¹	Час, с	Вихідна величина, град с ⁻¹
0,5	0,45609	14	0,04646	27,5	0,04462
1	0,48737	14,5	0,04899	28	0,04232
1,5	0,47863	15	0,04761	28,5	0,04646
2	0,27922	15,5	0,05106	29	0,046
2,5	0,18101	16	0,05198	29,5	0,04117
3	0,22747	16,5	0,05129	30	0,04485
3,5	0,18561	17	0,04554	30,5	0,04531
4	0,16859	17,5	0,04715	31	0,04807
4,5	0,05727	18	0,04945	31,5	0,04508
5	0,06187	18,5	0,04876	32	0,04117
5,5	0,04991	19	0,04968	32,5	0,04738
6	0,05106	19,5	0,05221	33	0,0437
6,5	0,05152	20	0,0483	33,5	0,04094
7	0,05198	20,5	0,04922	34	0,04255
7,5	0,05635	21	0,05106	34,5	0,0437
8	0,0552	21,5	0,04899	35	0,04416
8,5	0,05106	22	0,04761	35,5	0,04209
9	0,05359	22,5	0,04393	36	0,04462
9,5	0,05106	23	0,04393	36,5	0,04554
10	0,04922	23,5	0,04945	37	0,04623
10,5	0,04991	24	0,04393	37,5	0,04784
11	0,04761	24,5	0,0437	38	0,04715
11,5	0,04807	25	0,04807	38,5	0,046
12	0,046	25,5	0,04807	39	0,04232
12,5	0,05083	26	0,046	39,5	0,04163
13	0,04738	26,5	0,04715	40	0,0437
13,5	0,04968	27	0,04485		

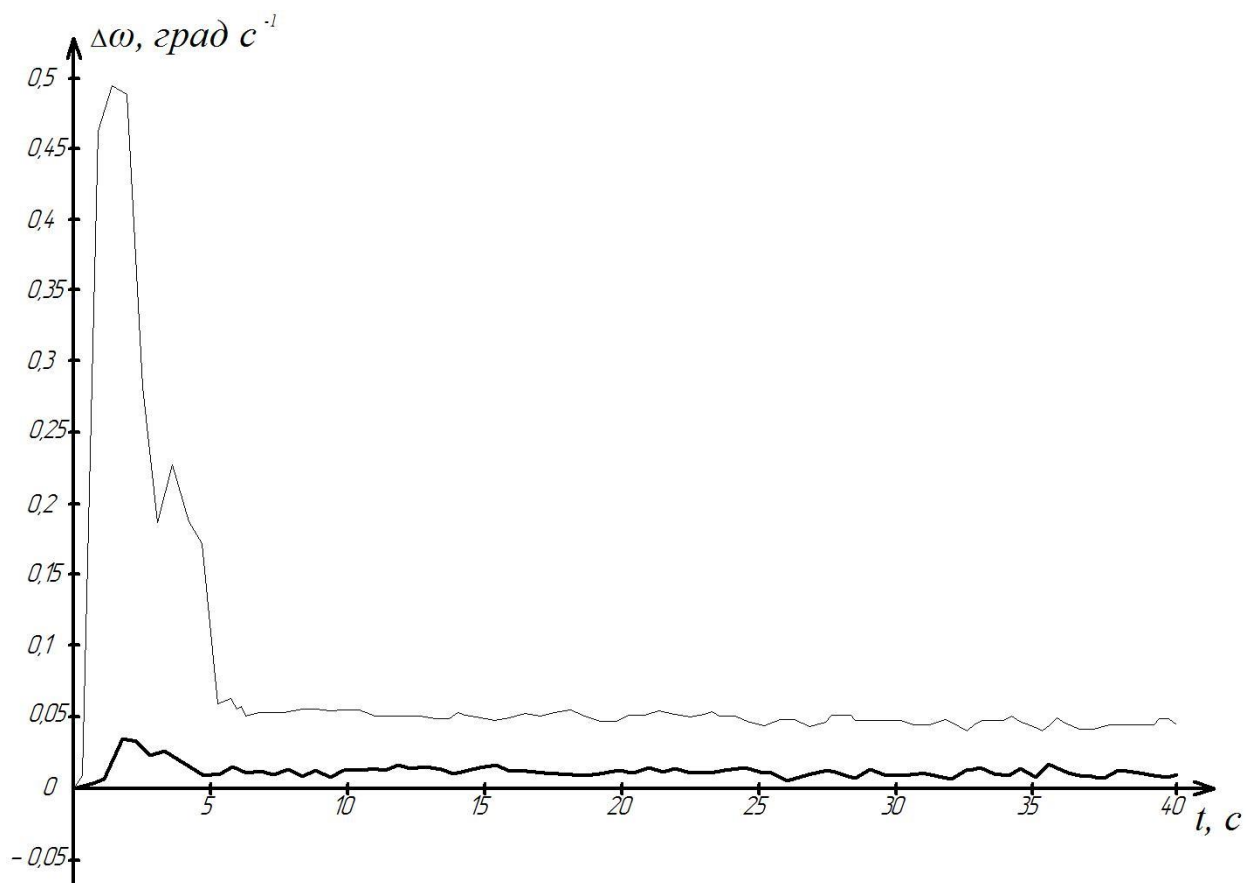
Додаток В-6

(продовження: $\varphi = 180^\circ$, з буферною зоною)

Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$
0,5	0	14	0,01242	27,5	0,00966
1	0	14,5	0,01518	28	0,0069
1,5	0,03496	15	0,0161	28,5	0,01311
2	0,03197	15,5	0,01265	29	0,01012
2,5	0,02277	16	0,01242	29,5	0,00805
3	0,02622	16,5	0,01173	30	0,00989
3,5	0,0207	17	0,01081	30,5	0,01035
4	0,01334	17,5	0,01012	31	0,00805
4,5	0,00897	18	0,00989	31,5	0,00598
5	0,00989	18,5	0,00874	32	0,01242
5,5	0,01472	19	0,01104	32,5	0,01449
6	0,01104	19,5	0,01242	33	0,00989
6,5	0,01196	20	0,01104	33,5	0,00897
7	0,0092	20,5	0,01449	34	0,0138
7,5	0,01357	21	0,0115	34,5	0,0069
8	0,00805	21,5	0,01311	35	0,01679
8,5	0,01242	22	0,01104	35,5	0,01127
9	0,00736	22,5	0,01081	36	0,0092
9,5	0,01242	23	0,01173	36,5	0,00828
10	0,01265	23,5	0,01357	37	0,00667
10,5	0,01288	24	0,01426	37,5	0,01311
11	0,01219	24,5	0,01127	38	0,01127
11,5	0,01564	25	0,01081	38,5	0,00943
12	0,01426	25,5	0,0046	39	0,00851
12,5	0,01472	26	0,00851	39,5	0,00736
13	0,01311	26,5	0,01104	40	0
13,5	0,01012	27	0,01265		

Додаток В-6

(продовження: $\varphi = 180^\circ$, тонка лінія – без буферної зони, контурна лінія – з буферною зоною)



Додаток В-7

Напівнатурні випробування промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2-30В в полі дії акустичного випромінювання: $\varphi = 225^\circ$, без буферної зони.

Час, с	Вихідна величина, град·с ⁻¹	Час, с	Вихідна величина, град с ⁻¹	Час, с	Вихідна величина, град с ⁻¹
0,5	0,03772	14	0,04071	27,5	0,03289
1	0,0437	14,5	0,03795	28	0,03266
1,5	0,04945	15	0,03266	28,5	0,03473
2	0,04508	15,5	0,03105	29	0,03726
2,5	0,04393	16	0,02852	29,5	0,04186
3	0,04554	16,5	0,04002	30	0,03864
3,5	0,03703	17	0,03726	30,5	0,03634
4	0,03772	17,5	0,03749	31	0,03979
4,5	0,04991	18	0,03427	31,5	0,03818
5	0,04324	18,5	0,03128	32	0,03979
5,5	0,03634	19	0,03933	32,5	0,03036
6	0,04393	19,5	0,0322	33	0,03634
6,5	0,03933	20	0,03542	33,5	0,03519
7	0,03059	20,5	0,03473	34	0,04232
7,5	0,03565	21	0,03266	34,5	0,03979
8	0,0276	21,5	0,03634	35	0,0299
8,5	0,02553	22	0,03473	35,5	0,03243
9	0,03312	22,5	0,03404	36	0,02921
9,5	0,02921	23	0,03565	36,5	0,02967
10	0,02714	23,5	0,03266	37	0,03013
10,5	0,02599	24	0,04232	37,5	0,0437
11	0,0299	24,5	0,03427	38	0,04255
11,5	0,0299	25	0,0345	38,5	0,04393
12	0,03818	25,5	0,04784	39	0,04209
12,5	0,03565	26	0,03841	39,5	0,04462
13	0,03795	26,5	0,03841	40	0,04209
13,5	0,03726	27	0,04278		

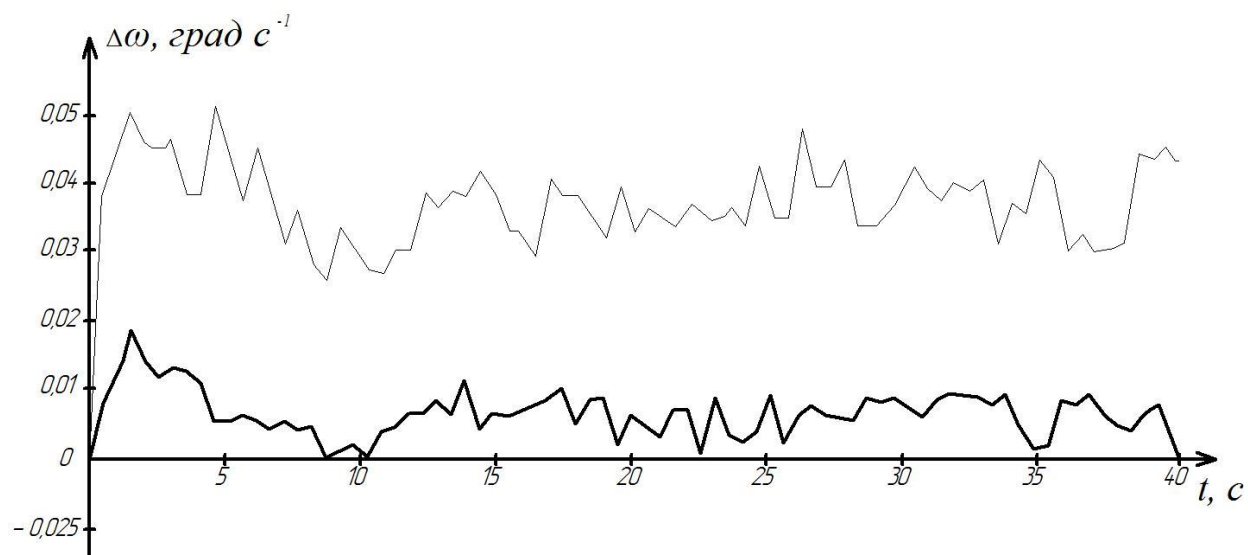
Додаток В-7

(продовження: $\varphi = 225^\circ$, з буферною зоною)

Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$
0,5	0,00805	14	0,00414	27,5	0,00552
1	0,01311	14,5	0,00644	28	0,00897
1,5	0,01909	15	0,00621	28,5	0,00805
2	0,01403	15,5	0,0069	29	0,00897
2,5	0,01173	16	0,00782	29,5	0,00736
3	0,01334	16,5	0,00874	30	0,00598
3,5	0,01288	17	0,01012	30,5	0,00851
4	0,01104	17,5	0,00506	31	0,00943
4,5	0,00552	18	0,00851	31,5	0,0092
5	0,00552	18,5	0,00897	32	0,00897
5,5	0,00621	19	0,00184	32,5	0,00782
6	0,00552	19,5	0,00621	33	0,00943
6,5	0,00414	20	0,00506	33,5	0,0046
7	0,00552	20,5	0,00322	34	0,00138
7,5	0,00437	21	0,00713	34,5	0,00184
8	0,00483	21,5	0,00713	35	0,00874
8,5	0	22	0,00046	35,5	0,00782
9	0,00092	22,5	0,0092	36	0,00943
9,5	0,0023	23	0,00345	36,5	0,00667
10	0	23,5	0,00253	37	0,00506
10,5	0,00391	24	0,00391	37,5	0,00391
11	0,00483	24,5	0,00943	38	0,00667
11,5	0,00644	25	0,0023	38,5	0,00782
12	0,00667	25,5	0,00621	39	0,00736
12,5	0,00851	26	0,00782	39,5	0,0069
13	0,00621	26,5	0,00621	40	0
13,5	0,01173	27	0,00598		

Додаток В-7

(продовження: $\varphi = 225^\circ$, тонка лінія – без буферної зони, контурна лінія – з буферною зоною)



Додаток В-8

Напівнатурні випробування промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2-30В в полі дії акустичного випромінювання: $\varphi = 270^\circ$, без буферної зони.

Час, с	Вихідна величина, град·с ⁻¹	Час, с	Вихідна величина, град с ⁻¹	Час, с	Вихідна величина, град с ⁻¹
0,5	0,05612	14	0,05911	27,5	0,05083
1	0,09936	14,5	0,05796	28	0,04945
1,5	0,06325	15	0,05175	28,5	0,05014
2	0,06003	15,5	0,05451	29	0,04922
2,5	0,05589	16	0,05014	29,5	0,05497
3	0,05566	16,5	0,05106	30	0,05474
3,5	0,05589	17	0,05221	30,5	0,05635
4	0,05658	17,5	0,05842	31	0,05152
4,5	0,05336	18	0,05727	31,5	0,04646
5	0,05566	18,5	0,05497	32	0,04462
5,5	0,05658	19	0,0575	32,5	0,04554
6	0,05543	19,5	0,05336	33	0,04094
6,5	0,05152	20	0,05267	33,5	0,04117
7	0,05382	20,5	0,05198	34	0,04485
7,5	0,05566	21	0,05382	34,5	0,04232
8	0,05152	21,5	0,05612	35	0,03496
8,5	0,04968	22	0,05382	35,5	0,03749
9	0,05014	22,5	0,05612	36	0,04002
9,5	0,04623	23	0,04991	36,5	0,04416
10	0,05244	23,5	0,04945	37	0,0437
10,5	0,04945	24	0,05244	37,5	0,04462
11	0,04922	24,5	0,05497	38	0,04439
11,5	0,05336	25	0,05658	38,5	0,04784
12	0,05566	25,5	0,05635	39	0,04646
12,5	0,05221	26	0,05451	39,5	0,04508
13	0,06049	26,5	0,05497	40	0,04554
13,5	0,05681	27	0,05037		

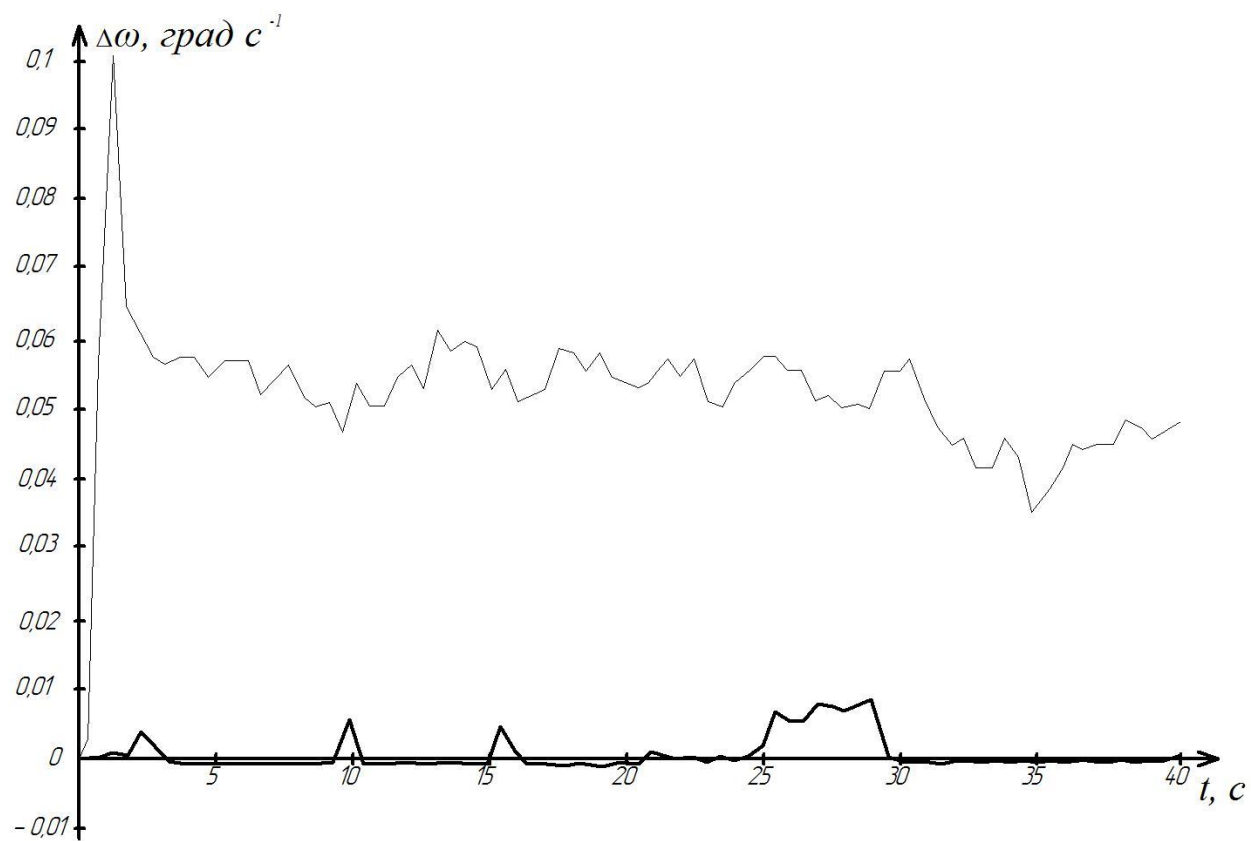
Додаток В-8

(продовження: $\varphi = 270^\circ$, з буферною зоною)

Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$
0,5	0,00023	14	-0,00069	27,5	0,00621
1	0,00069	14,5	-0,00069	28	0,00713
1,5	0,00046	15	0,00414	28,5	0,00782
2	0,00345	15,5	0,00115	29	0,00023
2,5	0,00161	16	-0,00069	29,5	-0,00023
3	-0,00023	16,5	-0,00069	30	-0,00046
3,5	-0,00069	17	-0,00069	30,5	-0,00046
4	-0,00069	17,5	-0,00069	31	-0,00046
4,5	-0,00069	18	-0,00069	31,5	-0,00046
5	-0,00069	18,5	-0,00069	32	-0,00023
5,5	-0,00069	19	-0,00069	32,5	-0,00046
6	-0,00069	19,5	-0,00069	33	-0,00023
6,5	-0,00069	20	-0,00069	33,5	-0,00046
7	-0,00069	20,5	0,00092	34	-0,00023
7,5	-0,00069	21	0,00046	34,5	-0,00046
8	-0,00069	21,5	0	35	-0,00023
8,5	-0,00046	22	0	35,5	-0,00046
9	-0,00046	22,5	-0,00046	36	-0,00023
9,5	0,00529	23	0	36,5	-0,00023
10	-0,00046	23,5	-0,00023	37	-0,00046
10,5	-0,00069	24	0,00023	37,5	-0,00023
11	-0,00069	24,5	0,00161	38	-0,00046
11,5	-0,00069	25	0,00621	38,5	-0,00023
12	-0,00069	25,5	0,00483	39	-0,00023
12,5	-0,00069	26	0,00483	39,5	-0,00023
13	-0,00069	26,5	0,00736	40	0
13,5	-0,00069	27	0,0069		

Додаток В-8

(продовження: $\varphi = 270^\circ$, тонка лінія – без буферної зони, контурна лінія – з буферною зоною)



Додаток В-9

Напівнатурні випробування промислового зразка гіроскопічного приладу класу ДУСУ2-30В в полі дії акустичного випромінювання: $\varphi = 315^\circ$, без буферної зони.

Час, с	Вихідна величина, град·с ⁻¹	Час, с	Вихідна величина, град с ⁻¹	Час, с	Вихідна величина, град с ⁻¹
0,5	0,10097	14	0,04278	27,5	0,0345
1	0,13317	14,5	0,04255	28	0,03588
1,5	0,04876	15	0,04186	28,5	0,03611
2	0,05842	15,5	0,04048	29	0,03358
2,5	0,07084	16	0,04209	29,5	0,03358
3	0,04439	16,5	0,04025	30	0,03243
3,5	0,03956	17	0,04232	30,5	0,03496
4	0,03887	17,5	0,0345	31	0,03749
4,5	0,04186	18	0,03542	31,5	0,0368
5	0,04209	18,5	0,03542	32	0,03818
5,5	0,03979	19	0,03749	32,5	0,03841
6	0,03956	19,5	0,03496	33	0,03473
6,5	0,03956	20	0,03427	33,5	0,0391
7	0,03864	20,5	0,03427	34	0,03818
7,5	0,04094	21	0,03795	34,5	0,03749
8	0,03841	21,5	0,03358	35	0,0345
8,5	0,04232	22	0,03634	35,5	0,03887
9	0,0414	22,5	0,03611	36	0,04002
9,5	0,04117	23	0,03979	36,5	0,03818
10	0,04439	23,5	0,03795	37	0,03772
10,5	0,03933	24	0,03795	37,5	0,03588
11	0,04416	24,5	0,03657	38	0,03565
11,5	0,04393	25	0,04048	38,5	0,03841
12	0,04646	25,5	0,03818	39	0,03565
12,5	0,04186	26	0,04048	39,5	0,03657
13	0,04324	26,5	0,03565	40	0,03588
13,5	0,04255	27	0,03519		

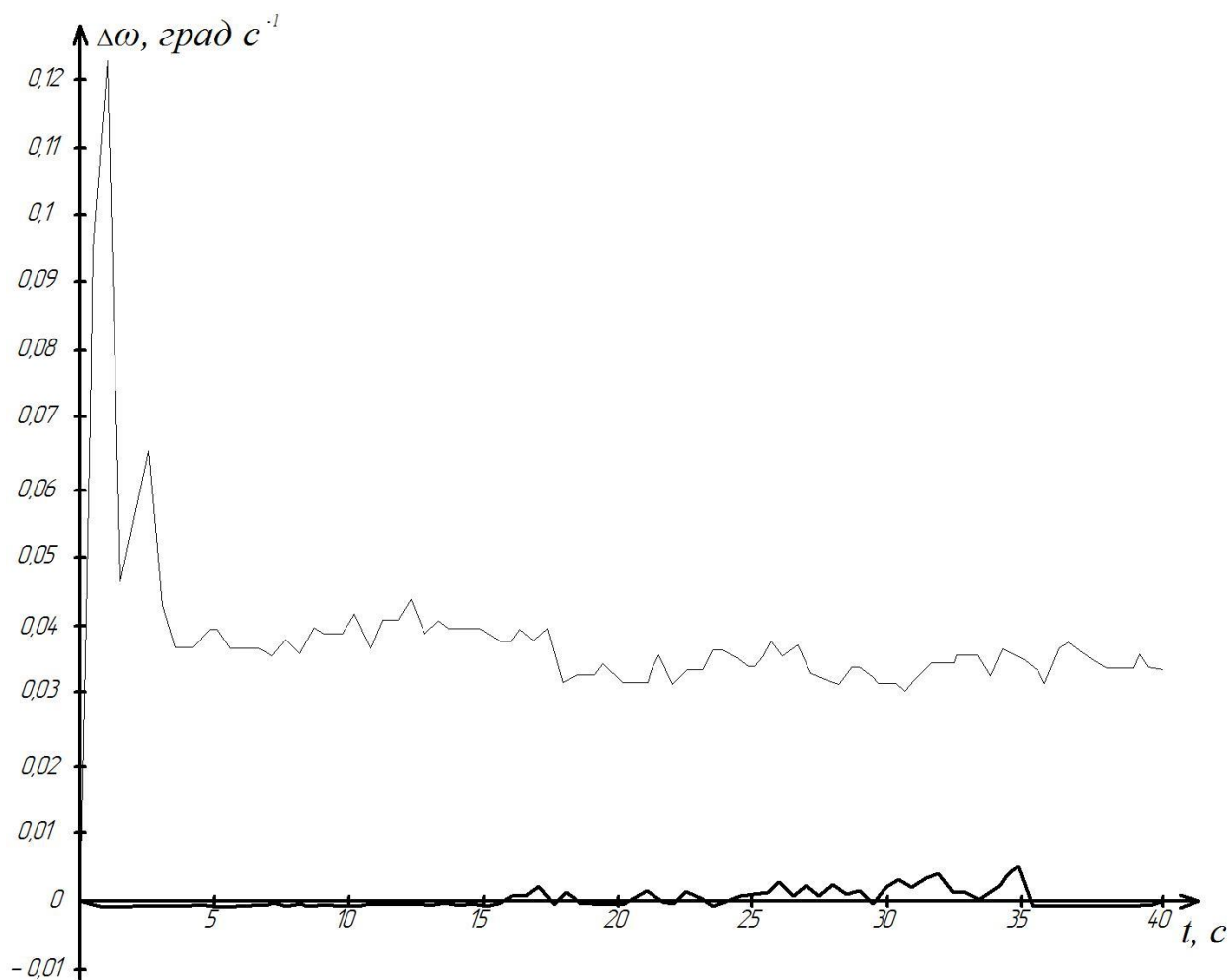
Додаток В-9

(продовження: $\varphi = 315^\circ$, з буферною зоною)

Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$	Час, с	Вихідна величина, $\text{град} \cdot \text{с}^{-1}$
0,5	-0,00046	14	-0,00046	27,5	0,00046
1	-0,00069	14,5	-0,00023	28	0,00184
1,5	-0,00069	15	-0,00069	28,5	0,00069
2	-0,00069	15,5	-0,00023	29	0,00115
2,5	-0,00069	16	0,00046	29,5	-0,00023
3	-0,00069	16,5	0,00046	30	0,00161
3,5	-0,00069	17	0,00161	30,5	0,00253
4	-0,00046	17,5	-0,00046	31	0,00138
4,5	-0,00046	18	0,00092	31,5	0,00253
5	-0,00069	18,5	-0,00023	32	0,00299
5,5	-0,00046	19	-0,00023	32,5	0,00092
6	-0,00046	19,5	-0,00046	33	0,00092
6,5	-0,00046	20	-0,00046	33,5	0
7	-0,00023	20,5	0	34	0,00092
7,5	-0,00046	21	0,00115	34,5	0,00276
8	-0,00023	21,5	0	35	0,00391
8,5	-0,00046	22	-0,00023	35,5	-0,00069
9	-0,00023	22,5	0,00115	36	-0,00069
9,5	-0,00069	23	0,00046	36,5	-0,00069
10	-0,00069	23,5	-0,00069	37	-0,00069
10,5	-0,00046	24	-0,00023	37,5	-0,00069
11	-0,00046	24,5	0,00046	38	-0,00069
11,5	-0,00046	25	0,00069	38,5	-0,00069
12	-0,00046	25,5	0,00092	39	-0,00069
12,5	-0,00023	26	0,00207	39,5	-0,00069
13	-0,00046	26,5	0,00046	40	-0,00046
13,5	-0,00023	27	0,00184		

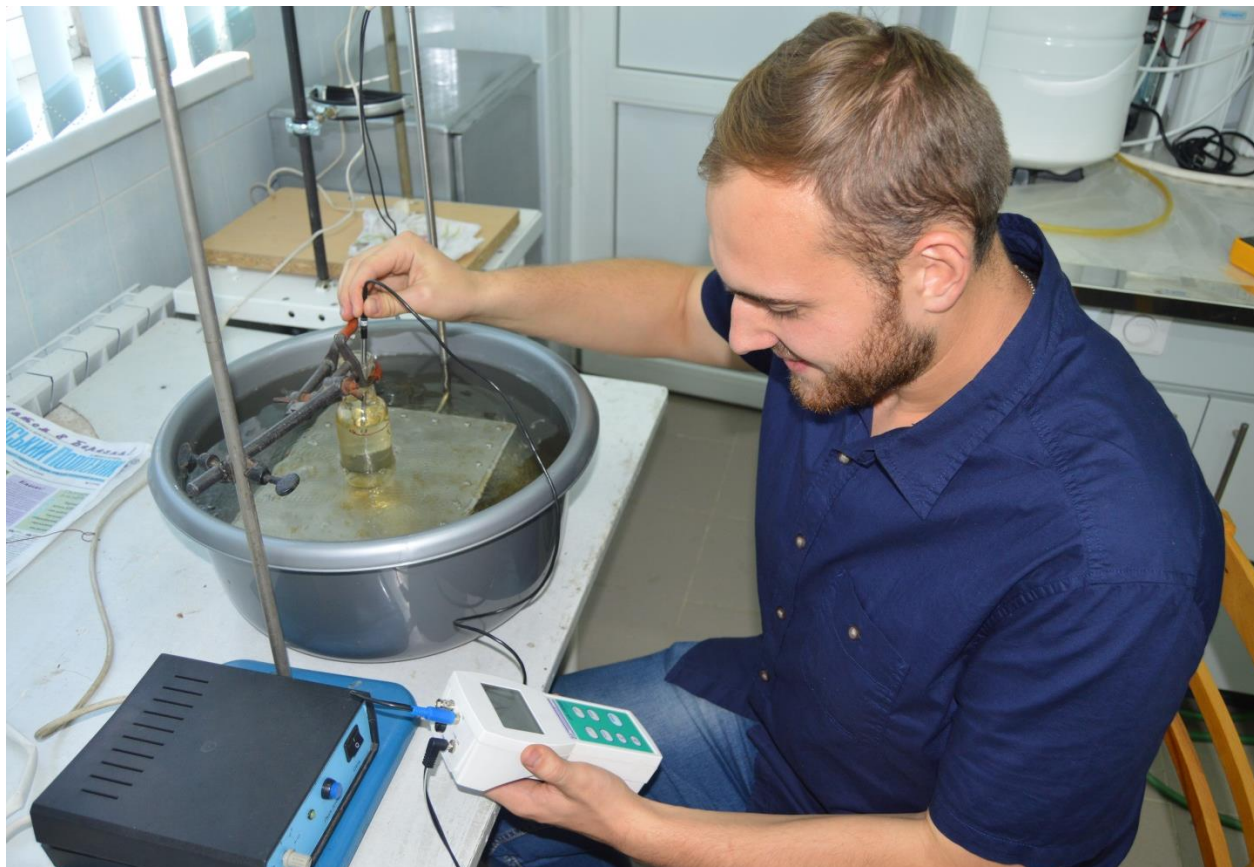
Додаток В-9

(продовження: $\varphi = 315^\circ$, тонка лінія – без буферної зони, контурна лінія – з буферною зоною)



Додаток Д-1

Зовнішній вигляд робочого місця для проведення стендових напівнатурних досліджень.



Додаток Е-1

Процес зникнення зображення макета *танка* під дією ультразвукового випромінювання при наближенні до зони хвильового співпадання.

а)



б)



Додаток Е-1
(Продовження)

в)



г)



д)



Додаток Е-2

Процес зникнення зображення макетів *обслуговуючих військову техніку людей* під дією ультразвукового випромінювання при наближенні до зони хвильового співпадання.

а)



б)



Додаток Е-2
(Продовження)

в)



г)



д)



Додаток Е-3

Процес зникнення зображення макета *літака тактичної палубної авіації* під дією ультразвукового випромінювання при наближенні до зони хвильового співпадання.

а)



б)



Додаток Е-3
(Продовження)

в)



г)



д)



Додаток Е-4

Процес зникнення зображення макета *субмарини* під дією ультразвукового випромінювання при наближенні до зони хвильового співпадання.

а)



б)



Додаток Е-4
(Продовження)

в)



г)



д)



Додаток Ж

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про
апробацію результатів дисертації.

За результатами досліджень опубліковано 20 наукових праць, у тому числі 4 статті у наукових фахових виданнях України, що входять до міжнародних наукометричних баз даних, 2 Патенти України на винахід, 3 роботи в інших виданнях, 11 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

13. Карачун В.В. Дифракція звукових хвиль на металевому кільці / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко // «Технологічний аудит та резерви виробництва». – 2016. – №6/2 (32). – С. 4-9. (Входить до: Index Copernicus, РИНЦ, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, DOAJ)

Здобувачем описано енергетичний стан рідини усередині обмеженого кільцем простору при різних напрямках дії звукового променя з плоским фронтом.

14. Karachun V. Reduction of technological risks of flight operation by artificial formation of the buffer zone to penetrating acoustic radiation / V. Karachun, V. Mel'nick, S. Fesenko // «Technology audit and production reserves». – 2017. – №4/1 (36). – Р. 19-24. (Входить до: Index Copernicus, РИНЦ, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, DOAJ)

Здобувачем встановлено можливість штучного формування зони каустики, яка виконує функції буферної зони на резонансному рівні хвильового співпадання.

15. Мельник В.М. Штучне формування зон активної турбулентності звуковими хвилями / В.М. Мельник, В.В. Карачун, С.В. Фесенко // «Міжнародний науковий журнал». – 2016. – №11 (21). – Т.1. – С. 85-89.

Здобувачем пояснюються причини концентрації звукових хвиль і виникнення глобального і локальних рушійних потоків рідини.

Додаток Ж

(Продовження)

16. Шибецкий В.Ю. Формирование энергетической активности высокочастотными акустическими полями / В.Ю. Шибецкий, С.В. Фесенко // «Міжнародний науковий журнал». – 2016. – №11 (21). – Т.1. – С. 108-110.

Здобувачем визначені кути співпадання для промислового зразка датчика кутових швидкостей.

17. Карачун В.В. Забезпечення скритної дислокації танка у фортифікаційних спорудах відкритого типу / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко // Scientific Journal «ScienceRise». – 2017. – №4 (33). – С. 31-36.

Здобувачем визначається можливість штучного формування огорожуючої поверхні на принципах побудови зон каустики з регульовим хвильовим співпаданням, дозволяє досягти повного маскуванню танка.

18. Карачун В.В. Аналіз технічної можливості маскуванню субмарини від засобів пеленгації / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко // «Технологічний аудит та резерви виробництва». – 2017. – №3/2 (35). – С. 28-32. (Входить до: Index Copernicus, РИНЦ, Ulrich's Periodicals Directory, BASE, DOAJ)

Здобувачем визначена можливість маскуванню субмарини за відсутності власного ходу.

19. Карачун В.В. Дифракция звуковых волн на перекрестном упругом шарнире подвеса гироскопа / В.В. Карачун, С.В. Фесенко // «Авиационно-космическая техника и технология». – 2017. – №7 (142). – С. 112-122. (Входить до: ELIBRARY.RU, Index Copernicus, CiteFactor, Academic Keys, Infobase Index, Google Scholar)

Здобувачем побудована розрахункова модель пружної взаємодії проникаючого акустичного випромінювання з плоскими ізотропними фрагментами підвісу гіроскопа.

Додаток Ж

(Продовження)

20. Патент № 110911 Україна, МПК: G01C 19/20. Поплавковий гіроскоп / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко. заявл. 14.05.2015; опубл. 25.02.2016, Бюл № 4/2016. – 4 с.

Здобувачем запропоновано додатково обладнати поплавковий підвіс тяжкими обручами в формі кільцевих сегментів.

21. Патент № 114459 Україна, МПК: G01C 19/20. Поплавковий гіроскоп, захищений від зон каустики / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко. заявл. 23.05.2016; опубл. 12.06.2017, Бюл № 11/2017. – 7 с.

Здобувачем запропоновано встановлення в порожнині корпусу приладу поздовжніх і поперечних канавок трикутної форми.

22. Фесенко С.В. Дослідження особливостей поведінки циліндричної оболонки в ультразвуковому полі / С.В. Фесенко, В.Ю. Шибецький // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2016): Дев'ята Міжнар. наук.-практ. конф., 17-18 травня 2016 р., Київ, Україна. – К. НАУ. – 2016. – С. 61.

Здобувачем здійснено порівняльний аналіз реалізації вихідного сигналу ДКШУ в полі дії акустичного випромінювання для двох випадків – ввімкненого та вимкненого гіроагрегата.

23. Karachun V.V. The nature of resonance features in the suspension of the gyroscope due to diffraction effects / V.V. Karachun, N.V. Ladogubets, S.V. Fesenko // THE SEVENTH WORLD CONGRESS “AVIATION IN THE XXI-st CENTURY” Safety in Aviation and Space Technologies, 19-21 September 2016, Kyiv, Ukraine. – Kyiv. NAU. – 2016. – P. 3.6.16.

Здобувачем розраховано радіуси поверхонь каустики.

24. Boiko G.V. Noise-protective case to fight the penetrating acoustic radiation / G.V. Boiko, V.V. Karachun, S.V. Fesenko // THE SEVENTH WORLD CONGRESS “AVIATION IN THE XXI-st CENTURY” Safety in Aviation and

Додаток Ж

(Продовження)

Space Technologies, 19-21 September 2016, Kyiv, Ukraine. – Kyiv. NAU. – 2016. – Р. 3.6.20.

Здобувачем проаналізовано існуючі конструкції пасивних методів звукоізоляції від проникаючого акустичного випромінювання.

25. Карачун В.В. Особливості структури похибок двоступеневого гіроскопа при наявному акустичному імпедансі / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко // XI Міжнар. наук.-техн. конф. «Приладобудування: стан і перспективи», 24-25 квітня 2012 р., Київ, Україна. – Київ, НТУУ «КПІ». – 2012. – С. 38.

Здобувачем окреслені особливості одночасної дії на підвіс поплавкового гіроскопа проникаючого акустичного випромінювання і кутової хитаючи об'єкта.

26. Мельник В.М. Локальная аттестация поплавкового гироскопа на функциональную способность / В.М. Мельник, В.В. Карачун, С.В. Фесенко // XI Міжнар. наук.-техн. конф. «Приладобудування: стан і перспективи», 24-25 квітня 2012 р., Київ, Україна. – Київ, НТУУ «КПІ». – 2012. – С. 39.

Здобувачем проаналізовані способи перевірки працездатності гіроскопів на стартових позиціях.

27. Фесенко С.В. Проникающее акустическое излучение как фактор ухудшение технических характеристик РН / С.В. Фесенко, В.М. Мельник, В.В. Карачун // XIV Міжнар. молод. наук.-практ. конф. «Людина і космос», 11-13 квітня 2012 р., Дніпропетровськ, Україна. – Дніпропетровськ: НЦАОМУ ім. О.М. Макарова. – 2012. – С. 30.

Здобувачем описані особливості акустичного поля реактивного струменя.

28. Фесенко С.В. Турбулізації середовища в полі ультразвукового випромінювання / С.В. Фесенко // XIX Міжнар. молод. наук.-практ. конф.

Додаток Ж

(Продовження)

«Людина і космос», 12-14 квітня 2017 р., Дніпро, Україна. – Дніпро: НЦАОМУ ім. О.М. Макарова. – 2017. – С. 30.

29. Фесенко С.В. Встановлення особливостей виникнення систематичної похибки вимірювань ДУСУ в полі дії ультразвукового випромінювання / С.В. Фесенко, В.Ю. Шибецький // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси (ІРТК-2017): Десята Міжнар. наук.-практ. конф., 16-17 травня 2017 р., Київ, Україна. – К. НАУ. – 2017. – С. 61.

Здобувачем встановлено систематичну похибку ДУСУ під дією ударної N-хвилі.

30. Фесенко С.В. Вплив ультразвукового випромінювання на металеву конструкцію / С.В. Фесенко // XIII Міжнар. наук.-техн. конф. «ABIA-2017», 19-21 квітня 2017 р., Київ, Україна. – К. НАУ. – 2017. – С. 27.117.

31. Фесенко С.В. Точність позиціонування інерціальних приладів навігації у високочастотних акустичних полях / С.В. Фесенко, В.Ю. Шибецький // XIII Міжнар. наук.-техн. конф. «ABIA-2017», 19-21 квітня 2017 р., Київ, Україна. – К. НАУ. – 2017. – С. 12.69.

Здобувачем здійснено стендові випробування гіроскопічного приладу ДУСУ2-30В.

32. Карачун В.В. Маскування та обмежена помітність вогневої техніки у фортифікаційних засобах відкритого типу / В.В. Карачун, В.М. Мельник, С.В. Фесенко // Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ: Міжнар. наук.-техн. конф., 11-12 травня 2017 р., Львів, Україна. – Львів: НАСВ. – 2017. – С. 89

Здобувачем визначена можливість маскування та обмеженої примітності вогневої техніки.