Технические науки

УДК 629.1.05

**Бойко Галина Владимировна**
*кандидат технических наук,*
*ученый секретарь отдела ученого секретаря*
*КПИ имени Игоря Сикорского*
*Национальный технический университет Украины*
*«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*
**Бойко Галина Володимирівна**
*кандидат технічних наук,*
*вчений секретар відділу вченого секретаря*
*КПІ імені Ігоря Сікорського*
*Національний технічний університет України*
*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*
**Boiko Galina**
*Candidate of Technical Sciences,*
*Academic Secretary of the Scientific Secretary Department of*
*Kiev Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky*
*National Technical University of Ukraine*
*«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»*

**Гнатейко Нонна Валентиновна**
*кандидат технических наук, доцент,*
*доцент кафедры динамики,*
*прочности машин и сопротивления материалов*
*Национальный технический университет Украины*
*«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*
**Гнатейко Нонна Валентинівна**
*кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри динаміки,*
*міцності машин та опору матеріалів*

*Національний технічний університет України*
*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*
**Gnateiko Nonna**
*Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor,*
*Associate Professor of Department of the*
*Dynamics and Strength of Machines and the Resistance of Materials*
*National Technical University of Ukraine*
*"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"*

# ПОГЛОЩЕНИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ПАССИВНЫМИ МЕТОДАМИ
# ПОГЛИНАННЯ ЗВУКОВИХ ДІЙ ПАСИВНИМИ МЕТОДАМИ
# ABSORPTION OF SOUND INFLUENCES BY PASSIVE METHODS

***Аннотация.*** *Строится и анализируется расчетная схема резонатора Гельмгольца. Приводятся основные характеристики резонатора Гельмгольца и приводятся табличные данные необходимых величин для расчета технических характеристик резонатора.*

***Ключевые слова:*** *резонатор Гельмгольца, перфорированный экран, звуковая волна.*

***Анотація.*** *Будується і аналізується розрахункова схема резонатора Гельмгольца. Наводяться основні характеристики резонатора Гельмгольца і наводяться табличні дані необхідних величин для розрахунку технічних характеристик резонатора.*

***Ключові слова:*** *резонатор Гельмгольця, перфорований екран, звукова хвиля.*

***Summary.*** *The design scheme of the Helmholtz resonator is built and analyzed. The main characteristics of the Helmholtz resonator are determined*

*and tabular data of the necessary quantities for calculating the technical characteristics of the resonator are given.*

***Key words:*** *Helmholtz resonator, perforated screen, sound wave.*

**Введение.** К применяемой в поплавковых интегрирующих гироскопах (ИГ) поддерживающей жидкости, как правило, предъявляются следующие требования. Плотность жидкости должна находиться в пределах *1,8 – 2,5 г/см*$^3$ , ее вязкость должна составлять *1000 – 5000 спз*. Кроме того, она призвана обеспечивать необходимую химическую стабильность при контакте с деталями прибора, высокую теплопроводность, максимально низкую токсичность и нечувствительность к воздействию световых лучей, быть негигроскопичной, а также нейтральной к водяному пару. Это не считая обязательной невоспламеняемости и полного отсутствия электропроводности, а также узкого диапазона молекулярных весов.

Химической совместимости можно достичь двумя методами – выбором жидкости и выбором материалов, погружаемых в эту жидкость. Как известно, некоторые конструкционные материалы гироскопа не допускают замены, например, материала токоподводов, магнитных материалов ДУ, ДМ и подвеса, поэтому жидкость должна обладать безусловной совместимостью с ними.

Требования к плотности, модулю упругости и химическому составу других материалов, например, заливочным компаундам и клеям, являются менее жесткими, что облегчает выбор материалов по принципу совместимости.

Поддерживающая жидкость должна быть химически стабильной даже в присутствии конструкционных материалов. Кроме того, требуется, чтобы она была механически устойчивой, т.е. имела узкий диапазон молекулярных весов.

Жидкость, подобранная по плотности и вязкости, может расслаиваться, если отсутствует непрерывное перемешивание или же подвергаться тепловой диффузии.

Наличие летучих фракций является нежелательным качеством, так как приводит к изменению плотности и вязкости в условиях вакуума при заливке прибора, сопровождающейся вытеснением всех газов и паров из заполненного зазора между поплавком и корпусом.

Согласно имеющимся данным, любое постороннее вещество в поддерживающейся жидкости, включая газы, катастрофически ухудшает точность гироскопа, а в некоторых случаях может привести и к заклиниванию поплавка, т.е. к выходу прибора из строя.

Если требование чистоты очевидно и не нуждается в детальном обосновании, то требование дегазации нуждается в пояснении. Помимо захвата больших количеств газа, нарушающих функциональную способность жидкостатического подвеса, существенные затруднения возникают с появлением мелких пузырьков газа. На границе пузырька с жидкостью действуют силы поверхностного натяжения, вследствие чего пузырек связывает корпус и поплавок упругой связью, подобно пружине. Наконец, при наличии вибрации места установки пузырек, примыкающий к поплавку, нарушает равновесие жидкостатических давлений [1; 2].

Ни в одном из проанализированных случаев форму и местонахождение пузырька нельзя принять фиксированными и поэтому его влияние на гироскоп приходится рассматривать не только как нестационарное, но вообще как непредсказуемое.

Как ни странно, на первый взгляд, но решение задач терморегуляции вступает в противоречие с не менее важной проблемой уменьшения влияния на приборы инерциальной навигации проникающего акустического излучения, особенно с оглядкой на жесткие условия гиперзвуковых технологий [3, 4]. Суть проблемы лежит на поверхности.

Жидкостатическая часть подвеса изначально служит прекрасным транслятором звуковых волн. Нагреваясь от работающего гиромотора, она понижает скорость звука, поступающего извне на поплавковый подвес и, одновременно, способствует уменьшению степени проявления дифракционных эффектов с последующим ослаблением напряженного состояния подвеса [5; 6]. Из чего следует, что охлаждение жидкости нежелательно.

С другой стороны, транслируя избыточное тепло в окружающую прибор среду, тепловой кожух дополнительно нагревает воздух вне корпуса гироприбора и, тем самым, повышает скорость поступающих извне звуковых волн, увеличивает амплитуду генерируемой в корпусе акустической вибрации и, соответственно, упругие перемещения поверхности подвеса, что приводит к увеличению погрешности гироскопа.

Таким образом, система терморегуляции в том виде, в каком она функционирует, входит в противоречие с необходимостью решения задач нейтрализации действия внешних ударных звуковых волн [7; 8].

*Резонансные поглотители звуковых волн*

*Panakeia* от возникшего несоответствия является выполнение поверхности теплового кожуха перфорированной, т.е. с сквозными отверстиями одинаковой (или различной) площади поперечного сечения. Эти отверстия, прежде всего, увеличат площадь теплоотдачи, с другой стороны – резонаторы обеспечат рассеяние звуковой энергии и построение нужной полосы частот максимально ослабленного проникающего акустического излучения. Под резонансными поглотителями в прикладной акустике часто понимают резонансные системы вида *масса – пружина*, называемые резонаторами Гельмгольца (рис. 1). Колеблющаяся масса есть ни что иное, как масса воздуха в узком отверстии (или щели), а роль пружины выполняет воздушная подушка – воздушная полость в конце отверстия (щели) [9].

Представим схему резонатора Гельмгольца в виде

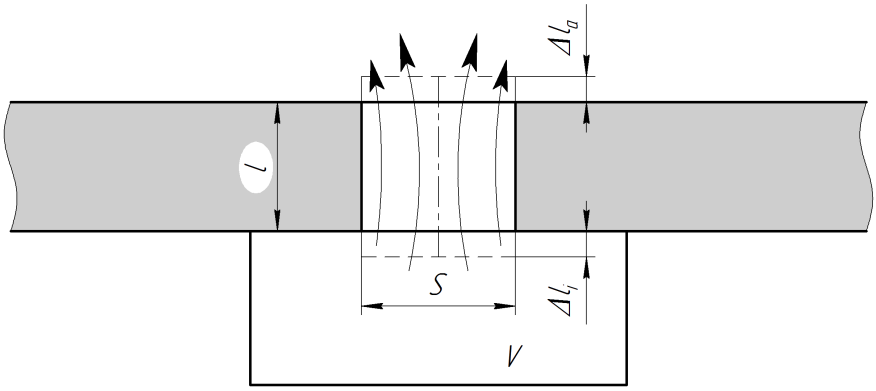


**Рис. 1. Резонатор Гельмгольца**

Тогда, собственная круговая частота $\omega_0$ системы *масса – пружина* вычисляется по формуле

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{c}{m}},$$

где $c = \frac{\rho_0 c_0^2 S^2}{V}$ - жесткость пружины; $c_0 = 330\ м/с$ - скорость звука в однородной воздушной среде; $S$ - площадь поперечного сечения горлышка (шейки) резонатора; $V$ - объем внутренней полости резонатора; $\rho_0 = 1,293\ кг/м^3$ - плотность в однородной среде при $0\ ^0C$ (в данном случае в воздухе).

Масса $m$ включает массу воздуха в шейке резонатора

$$m_{ш} = \rho_0 S \ell$$

и колеблющуюся вместе с ней присоединенную массу окружающего воздуха (рис. 1)

$$m_{П} = \rho_0 S\left(\Delta\ell_i + \Delta\ell_a\right).$$

Отсюда следует, что собственная частота резонатора Гельмгольца $f_0$ рассчитывается по формуле –

$$f_0 = \frac{c_0}{2\pi}\sqrt{\frac{S}{V\left(\ell + \Delta\ell_i + \Delta\ell_a\right)}}.$$

Поправочные коэффициенты $\Delta\ell_i$ и $\Delta\ell_a$ зависят от формы шейки и от площади ее поперечного сечения, причем

$$\Delta\ell_i \neq \Delta\ell_a.$$

Однако для некоторых простых фигур поперечного сечения шейки можно принять

$$\Delta\ell_i \approx \Delta\ell_a \approx \Delta\ell,$$

а в дальнейшем учитывать особенности поправочных коэффициентов (табл. 1), рис. 2, рис. 3, рис. 4, рис. 5.

*Таблица 1*

**Поправочный коэффициент $\Delta\ell$**

| № | Типы отверстий | $\Delta\ell$ |
|---|---|---|
| 1. | Круглое отверстие в протяженной пластине | $0,75r < \Delta\ell < 0,85r$ |
| 2. | Эллиптическое отверстие в протяженной пластине | $\Delta\ell = \frac{1}{2} b \int_0^{\frac{T}{2}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \cos^2\theta \right]^{-\frac{1}{2}} \partial\theta,$ $a, b$ – полуоси эллипса |
| 3. | Щель в протяженной пластине | $\Delta\ell = \frac{b}{\pi} \ln\left( \frac{c_0}{f_b} \right) - 0,107$ |
| 4. | Резонатор с узкой полостью без экранирующей пластины около горла | ------ |
| 5. | Круглые отверстия, равномерно расположенные на пластине | $\Delta\ell = 0,79r \left( 1 - 1,47\sqrt{\varepsilon} + 0,47\varepsilon^{\frac{3}{2}} \right),$ $\varepsilon = \pi \frac{r^2}{d^2}$ |
| 6. | Ряд щелей, равномерно расположенных на пластине | $\Delta\ell \approx -\frac{b}{\pi} \ln\sin\left( \frac{\pi\varepsilon}{2} \right),$ $\varepsilon = \frac{b}{d}$ |
| Примечание: $r$ – радиус отверстия; $b$ – ширина щели; $d$ – расстояние между центрами отверстий; $\varepsilon$ - отношение площади отверстий к общей площади (площадь перфорации); $a \ll \lambda_0$, $\lambda_0$ - длина звуковой волны; $b \ll \lambda_0$, $d \ll \lambda_0$. | | |

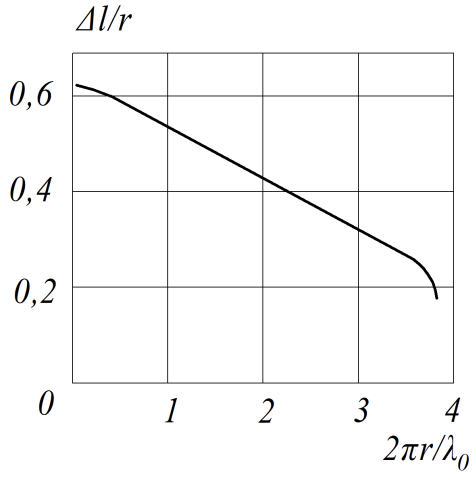


**Рис. 2. Поправочный коэффициент $\Delta\ell$ для шейки резонатора в виде трубы радиуса *r***

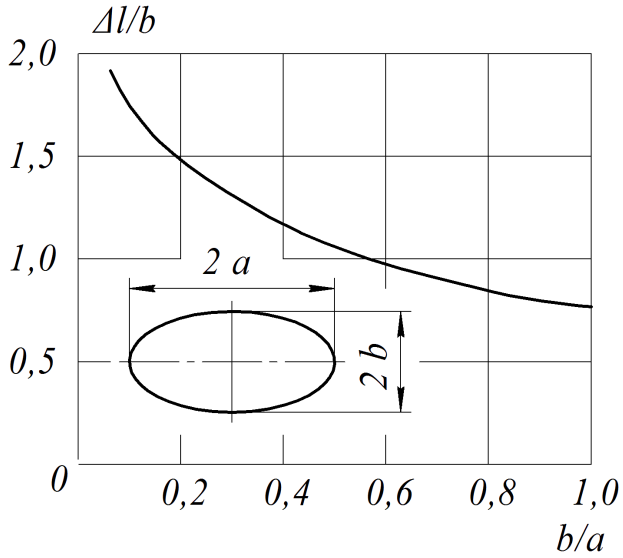


**Рис. 3. Зависимость величины $\Delta\ell / b$ от величины $\Delta\ell / a$ для эллиптического отверстия в пластине**

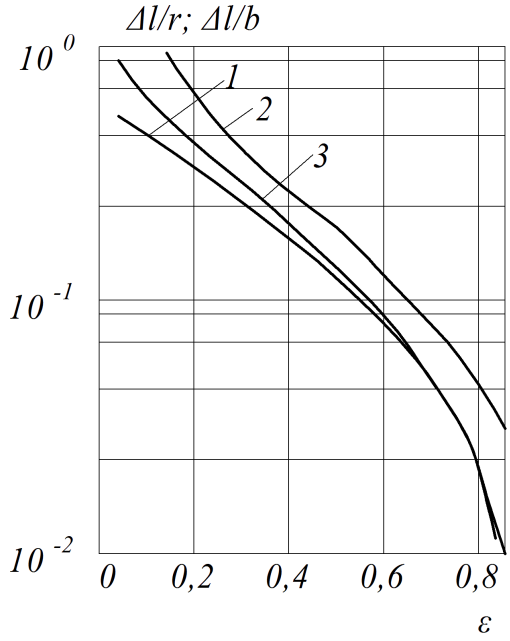


**Рис. 4. Зависимость величины $\Delta\ell / r$ и $\Delta\ell / b$от коэффициента перфорации $\varepsilon$:** 1) $\dfrac{\Delta\ell}{r} = 0,79\left(1 - 1,47\sqrt{\varepsilon} + 0,47\sqrt{\varepsilon^3}\right)$;

2) $\dfrac{\Delta\ell}{b} = \dfrac{1}{\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\dfrac{\sin^2(n\pi\varepsilon)}{(n\pi\varepsilon)^2}$; 3) $\dfrac{\Delta\ell}{b} = -\dfrac{1}{\pi}\ln\sin\dfrac{\pi\varepsilon}{2}$; $r$ – радиус круглых отверстий;

$b$ – ширина прорези в щелевом резонаторе

Сопротивление перфорированных экранов с отверстиями сложной конфигурации, в том числе в виде прорезей, определяют экспериментально. В первом приближении коэффициент звукопоглощения однослойного экрана для наклонно падающей волны можно оценить по формуле для круглых отверстий

$$\alpha(\theta) = 4R\rho_0 c\cos\theta\left\{(R\cos\theta + \rho_0 c)^2 + \left[m\omega\cos\theta - \rho_0 c\, ctg\left(kL\cos\theta\right)\right]^2\right\}^{-1},$$

где $k = \omega c^{-1}$ - волновое число; $\rho_0 c$ - удельное акустическое сопротивление воздуха; $L$ – толщина воздушного промежутка позади экрана; $R = rSS_1^{-1}$ - активная составляющая сквозного сопротивления; $S$ - площадь экрана на одну прорезь; $S_1$ - площадь одной прорези; $r$ - сопротивление продуванию (для ткани, например, $r = 0,25\rho_0 c$); $m$ - эффективная масса экрана.

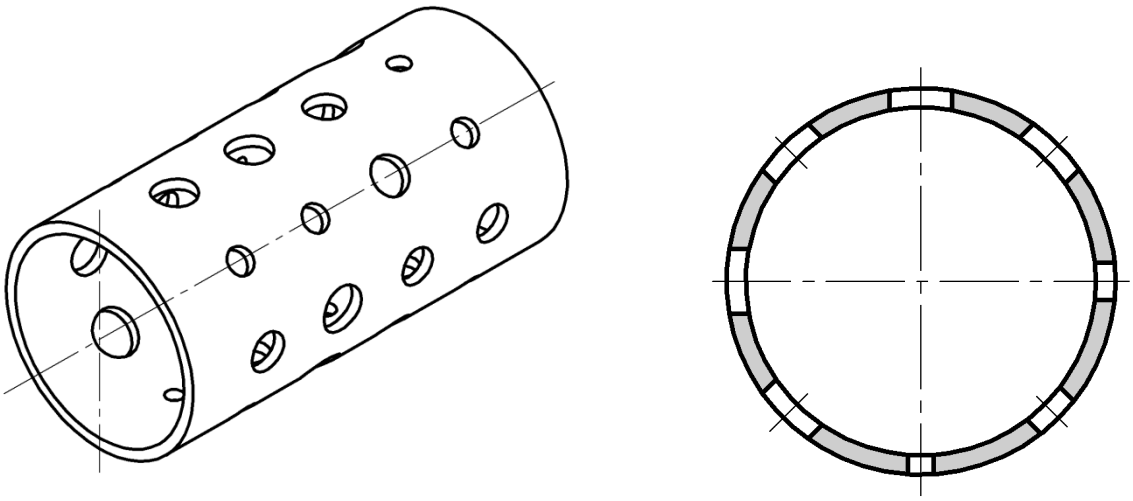

**Рис. 5. Теплоизолирующий кожух с резонаторами**

Эффективная масса перфорированного экрана (при достаточной его массивности) равна присоединенной массе воздуха, которую определяют, например, для перфорированного экрана с отверстиями по формуле

$$m = \rho_0\left\{\left[D\left(1,13Dd^{-1}\right) - 1,21\right] + 1,27LD^2d^{-2}\right\},$$

где $D$ - шаг перфорации; $d$ - диаметр отверстия; $\rho_0$ - плотность свободного воздуха.

Эффективная масса экранирующего теплового кожуха пропорциональна плотности воздуха $\rho_0$ и с ее увеличением растет по линейному закону. На основании этого можно утверждать, что эффективность такого экрана с увеличением акустического давления будет возрастать. Подтверждением тому служат результаты экспериментальных исследований физической модели рассматриваемого устройства из двух коаксиальных цилиндров.

Акустические свойства перфорированного экрана, как правило, оценивают по его сопротивлению продуванию, имеющему комплексный характер. Действительной его частью – трением – при отверстиях диаметром более *2 мм* можно пренебречь. Сопротивление экрана зависит от присоединяемой массы воздуха в отверстиях и массы эффективной поверхности листа

$$z_a = i2\pi fm,$$

где $m$ - общая эффективная масса экрана, отнесенная к единице его площади.

Присоединенная масса воздуха $m_1$ для одного круглого отверстия площади $S_1$ равна -

$$m_1 \approx \rho_0 \left( S_1 h + \frac{S_1^2}{d} \right),$$

где $\rho_0$ - плотность воздуха; $h$ - толщина экрана; $d$ – диаметр отверстия.

Присоединенная масса воздуха $m_1$ экрана, отнесенная к единице площади $S$ при взаимном влиянии отверстий может быть определена из формулы

$$m_1 = \rho \left[ \left( D \frac{1{,}13D}{d} - 1{,}21 \right) + 1{,}27L \frac{D^2}{d^2} \right],$$

где $D$ – шаг перфорации, выполненной в виде отверстий в вершинах квадратов (рис. 6).

Из приведенной формулы следует, что присоединенная масса воздуха возрастает с увеличением шага перфорации *D,* толщины экрана $h$ и отношения $\frac{D}{d}$.

Масса $m_2$ единицы площади экрана определяется формулой

$$m_2 = \rho_э h\left(1+\frac{S_1}{S}\right)\left[\frac{H}{м^2}\right],$$

где $\rho_э$ - плотность материала экрана; $S$ – площадь экрана, приходящаяся на одно отверстие; $S_1$ - площадь отверстия.

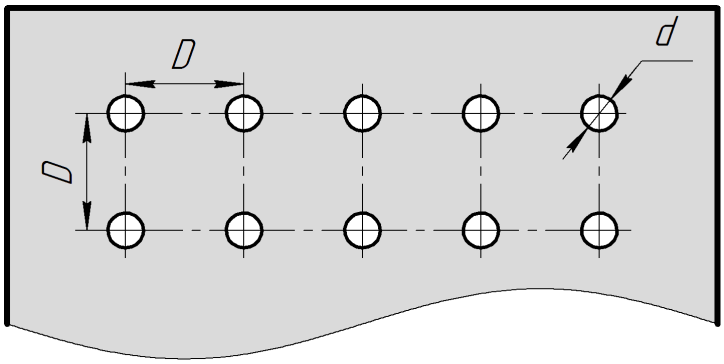


**Рис. 6. Расположение отверстий в перфорированном экране**

**Общая эффективная масса экрана $m$ вычисляется по формуле:**

$$m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}.$$

Во многих случаях $m_2$ значительно превышает $m_1$ и произведение эффективной массы $m$ на единицу его площади равно $m_1$.

Очень часто для подавления звукового излучения используют конструкции в виде резонатора Гельмгольца (*Helmholtz*) (рис. 1). Он состоит из воздушной полости, соединенной с окружающей средой посредством шейки [10].

При небольших, в сравнении с длиной звуковой волны, размерах он может рассматриваться как колебательная система с одной степенью свободы, у которой роль материальной точки выполняет масса воздуха в

шейке вместе с колеблющейся около ее отверстия массой присоединенного воздуха. Эффект упругости создает воздух в полости.

Собственная частота $f_0$ резонатора определяется соотношением (рис. 7) –

$$f_0 = \frac{1}{2} c_0 r \sqrt{\frac{\ell + 1{,}6r}{\pi V}},$$

где $c_0$ – скорость звука.

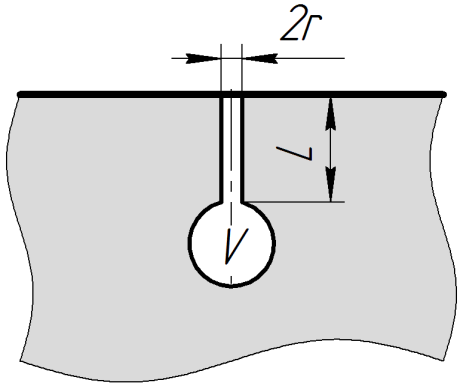


**Рис. 7. Резонатор Гельмгольца**

**Выводы.** Резонатор поглощает часть энергии падающих на него звуковых волн в том случае, если шейка оказывает сопротивление трения проходящему воздушному потоку. Понятно, что это будет иметь место при малом диаметре $2r$ шейки наряду с достаточной ее протяженностью $\ell$. Сопротивление можно увеличить, если поперек шейки расположить, например, тонкую ткань. Рассеяние энергии звуковых волн резонатором осуществляется в достаточно узкой полосе частот.

## Литература

1. Мельник В.М. Вплив анізотропності рідиннофазної частини підвісу на похибку інтегруючого гіроскопа // Вісник НТУУ "КПІ". ПРИЛАДОБУДУВАННЯ. 2003. Вип. 25. – С. 94-97.

2. Мельник В.Н., Карачун В.В. Некоторые аспекты гироскопической стабилизации в акустических полях // Прикл. механика, 2002, 38. № 1. С. 95-101.
3. Karachun, V., Mel'nick, V., Korobiichuk, I., Nowicki, M., Szewczyk, R., Kobzar, S. The additional error of inertial sensors induced by hypersonic flight conditions/ Sensors (Switzerland). Volume: 16. Issue: 3. Year: 2016-02-26. EID: 2-s2.0-84959187681. Scopus ID: 84959187681. DOI: 10.3390/s16030299.
4. Mel'nick, V., Karachun, V. The emergence of resonance within acoustic fields of the float gyroscope suspension. EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies.ISSN: 17293774. Volume: 1. Issue: 7. Pages: 39-44. Year: 2016-01-01. EID: 2-s2.0-84960858488. Scopus ID: 84960858488. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59892.
5. Карачун В.В., Гнатейко Н.В. Волновые процессы в механических системах космического аппарата под влиянием акустического излучения // Космічна наука і технологія, 1996. Т. 2. № 3-4. С. 55-57.
6. Мельник В.Н., Карачун В.В. Определение погрешности гироскопического интегратора, обусловленных дифракцией звуковых волн // Прикл. механика. 2004. Т. 40, № 3. С. 109-120.
7. Мельник В.М. Зниження технологічних ризиків суборбітального і атмосферного експлуаційного використання керованих і безпілотних літальних апаратів/ Multidisciplinary International scientific journal "Internauka". №3(25)/2017. Т.1. С. 150-159
8. Мельник В.М., Бойко Г.В. Возникновение акустической вибрации в круглой пластине. Нестационарная задача // Вісник двигунобудування. 2016, №2/2016. С. 81-86.
9. Мельник, В.М. Розсіяння енергії звукових хвиль перфорованим екраном [Текст]/ В.М.Мельник // Strategiczne pytania swiatowej nauki –

2014: materialy x miedzynarodovej naukowi - praktycznej konferencji, Peremys'l, Nauka I studia, 07-15 lutego 2014 roku. Str. 58-60.

10. Патент 109366 Україна, МПК G01C 19/20 (2006.01). Поплавковий гіроскоп [Текст]/ В.М.Мельник, В.В. Карачун, В.Ю. Шибецький, Г.В. Бойко. Заявники і патентовласники В.М.Мельник, В.В. Карачун, В.Ю. Шибецький, Г.В. Бойко. - № а 201406618; заявл. 13.06.2014 р.; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 15. – 1 с.: іл.