

9. Gaft, J. Design and calculation of mechanical seals with self-adjusting clearance [Text] / J. Gaft, V. Martsinkovskyy, B. Gromyko, A. Zahorulko // Proc. XVII Int. Conf. on Fluid sealing, BHR Group, York, England, 2003. – P. 505–520.
10. Gaft, J. Theoretical and experimental investigations of buffer face impulse seals [Text] / J. Gaft, A. Zahorulko, V. Martsinkovskyy, Cz. Kundera // 11th EDF/Pprime Workshop: “Behaviour of Dynamic Seals in Unexpected Operating Conditions”. Futuroscope, 2012. – P. 70–80.
11. Загорулько, А. В. Теоретические и экспериментальные исследования затворного торцового импульсного уплотнения с дискретным подводом [Текст] / А. В. Загорулько // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 4, № 7 (76). – С. 45–52. doi: 10.15587/1729-4061.2015.48298
12. Gas lubricated mechanical seals [Text]. – Feodor Burgmann Dichtungswerke GmbH & Co., First Edition, 1997. – 75 p.

УДК 629.7.054
DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59892

ВОЗНИКНОВЕНИЕ РЕЗОНАНСА В АКУСТИЧЕСКОЙ СРЕДЕ ПОДВЕСА ПОПЛАВКОВОГО ГИРОСКОПА

В. Н. Мельник

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой*
E-mail: karachun11@i.ua

В. В. Карачун

Доктор технических наук, профессор*
E-mail: karachun11@i.ua

*Кафедра биотехники и инженерии
Национальный технический
университет Украины

«Киевский политехнический институт»
пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

Виявлена природа прояву резонансних явищ в підвісі поплавкового двохступеневого гіроскопа в звукових полях гіперзвукового польоту, яка побудована на критичній зміні звукопроникності корпусу приладу. Окреслені умови формування в підвісі хвильового співпадання на високих і низьких частотах і виявлена ступінь впливу симетричного і антисиметричного імпедансу. Доведена ефективність боротьби з резонансом також резонансними методами

Ключові слова: гіперзвукові технології, поплавковий гіроскоп, хвильове співпадання, резонанс співпадання, антисиметричний імпеданс

Раскрыта природа проявления резонансных явлений в подвесе поплавкового двухступенного гироскопа в звуковых полях гиперзвукового полета, основанная на критическом изменении звукопроницаемости корпуса прибора. Очерчены условия формирования в подвесе волнового совпадения на высоких и низких частотах и установлена степень влияния симметричного и антисимметричного. Доказана эффективность борьбы с резонансом также резонансными методами

Ключевые слова: гиперзвуковые технологии, поплавковый гироскоп, волновое совпадение, резонанс совпадения, антисимметричный импеданс

1. Введение

Исследования относятся к области прикладной механики и посвящены изучению особенностей динамики подвеса поплавкового двухступенного гироскопа в эксплуатационных условиях гиперзвукового движения [1]. Изучается влияние звуковых полей на формирование особенностей резонансного типа в полагрегатном подвесе гироскопа [2]. Анализируются причины возникновения этих особенностей и их дальнейшее развитие. Предлагаются технические решения для создания “акустического комфорта” поплавковому гироскопу в натуральных условиях [3].

Гиперзвуковое оружие на базе гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ГПВРД) корнями своими уходит в недалекое прошлое феноменальных достижений советских КБ в области гиперзвукового движения. СССР успешно испытал гиперзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель на водородном топливе еще в 1983 году. Скорость опытного образца ракеты достигла 6,4 М.

Американская ракета X-51 VAVERIDER на ГПВРД без труда достигла скорости в 6 М. Опытный гиперзвуковой аппарат X-43 даже превысил этот показатель – его скорость составила 10 М.

Российское оборонное ведомство приступило к созданию совместно с индийскими специалистами противокорабельной сверхзвуковой ракеты BRAHMOS, которая на сегодняшний день считается самой скоростной крылатой ракетой из числа принятых на вооружение. Преимущество гиперзвуковых ракет состоит не только в меньшей их стоимости, но, прежде всего, в большей гибкости технологии применения.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В 2010 году военные США сообщили, что на базе SM-3 Block IIA будет сформировано ударное средство большой протяженности Arge Light. Планируется, что маршевые ступени противоракеты под-

нимут на гиперзвуковую скорость планирующее устройство (GLAIDER), которое будет возможным пронестись до 600 км и привезти к объекту боеголовку массой 50–100 кг. Общее расстояние лета будет равно 3800 км. Самое главное, на участке самостоятельного движения планер будет двигаться не по баллистической кривой. Это способствует увеличению маневренности и, естественно, более точному выведению на объект.

Программа FALCON предусматривает не только разработку разгонных ступеней, но также и разработку гиперзвукового GLAIDER в интересах GLOBAL PROMPT STRIKE. Частью этой программы является создание беспилотного самолета HTV-3X на гиперзвуковых прямоточных двигателях. Планер HYPERSONIC TECHNOLOGY VEHICLE-2 (HTV-2) в апреле 2010 года прошел летные испытания с помощью носителя MINOTAUR IV и достиг вполне гиперзвуковой скорости в 20 М [4].

Американские конструкторы начали разрабатывать также гиперзвуковые крылатые ракеты. В частности, созданная корпорацией BOEING ракета X-51 (WAVERIDER), благодаря своей конструкции, может формировать дополнительную подъемную силу за счет энергии ударных волн гиперзвукового полета. Эта ракета будет принята на вооружение уже в 2017 году [5].

Программа США стремительного широкомасштабного удара посредством гиперзвукового оружия дает возможность без радиационного заражения территории и в простейшем лишь одного только часа сразить какой-либо объект в какой угодно точке планеты.

Серьезную конкуренцию государственным программам в последнее время начинают составлять частные компании.

Следует обратить внимание на естественно протекающие при гиперзвуковом движении проблемы – чрезмерный нагрев корпуса ракеты и появляющиеся вследствие этого сложности в управлении, вибрация, плазма, N-волна, проникающее акустическое излучение и др.

Очевидно, что с увеличением скорости полета летных изделий, увеличиваются и технологические риски. Так, крайне неприятным моментом можно считать исчезновение радиосвязи вследствие возникающего плазменного экрана, блокирующего радиоволны. Это происходит, в частности, с гиперзвуковыми самолетами, которыми практически невозможно управлять дистанционно на скоростях выше 5–6 М.

Долгое время данную проблему не удавалось решить, что служило достаточным “тормозом” не только для стремительного расширения исследований на суборбитальных высотах, но, прежде всего, для прогресса в области гиперзвуковых технологий в целом.

Проблемы возникли также в управлении движением и в вопросах суборбитальной и атмосферной TERRA-аэронавигации. Прежде всего, это касается бортовой аппаратуры, в частности, систем инерциальной навигации. К примеру, гироскопические приборы с полигратным подвесом перестают соответствовать Паспортным требованиям. Причиной тому также стали резонансные явления.

“Старый багаж” известных методов и средств борьбы с вредными воздействиями перестал быть эффективным. Назрела потребность в создании новых технологий, которые смогли бы снизить риски и повысить безопасность полетов, что становится особенно важным для коммерческих пусков.

Ученый из Китая (Харбинский технологический институт), физик Сяотянь Гао (Xiaotian Gao) полагает, что присоединение специальной, “согласующей” прослойки из вещества с искусственно модулируемой электромагнитной природой к традиционным антеннам радиосвязи будет возможным сформировать характерный резонанс, который преодолет плазменную рубашку и создаст прочную телекоммуникацию с летным изделием. “Согласующая” прослойка будет действовать как конденсатор, накапливая энергию в цепи антенны, а плазменная рубашка, таким образом, сработает как индуктивность. Сообща они создадут резонансный контур, формирующий электромагнитные колебания между плазменной рубашкой и воздухом. Со временем, когда будет сформирована резонансная обстановка, энергия электромагнитных колебаний начнет транслироваться от плазмы к воздуху без диссипации. Аналогично будет проникать излучение радиопередатчика через “согласующую” прослойку и плазменную рубашку без препятствий, т.е. создается радиотрансляционная “прозрачность”. Неоспоримое преимущество такого метода в том, что “согласующая” прослойка может накладываться на аппарат произвольной геометрической конфигурации, тогда как иные средства связи нуждаются в дополнительной массивной аппаратуре [6].

В настоящей работе авторы анализируют динамику двухстепенного поплавкового гироскопа в поле проникающего акустического излучения. Установлено аналитически и подтверждено полунатурными испытаниями наличие в подвесе гироскопа трех геометрических резонансов, которые служат причиной резкого увеличения погрешностей измерений до недопустимых Паспортом на изделие значений.

Анализируется работа некоторых технических решений для подавления влияния прошедшего акустического излучения. Подобно борьбе с плазмой, эффективность этих средств также очерчена резонансными эффектами, в частности, с использованием объемной нелинейности щелевого резонатора.

Гироскопические приборы и устройства продолжают находить применение во многих отраслях техники [7]. Незаменимыми представляются гироскопы для решения задач автономного позиционирования крупногабаритных первых ступеней РН многократного использования. Ракета FALKON 9 впервые в истории освоения космоса успешно приземлилась на тяге маршевых двигателей после вывода спутников в космос [8]. Таким образом, освоение космоса вступает в новую эру многократных ракет, которые смогут летать, как минимум, несколько раз. Это с точки зрения практической космонавтики полемическое, но уже подтвержденное летными испытаниями техническое решение [9]. Скорее всего, запуск бывших в употреблении ракет будет стоить для заказчика дешевле и, значит, космос станет доступнее. Вместе с тем, пробле-

мы посадки многотонных РН на тяге своих двигателей еще не решены окончательно [10].

С посадкой на сушу фирма SPACE X, похоже, справилась. 21 декабря 2015 года первая ступень ракеты FALKON 9 успешно приземлилась неподалеку от места старта, хотя обольщаться на безусловное решение проблем автономной посадки первой ступени еще рано. К таким препятствиям следует отнести, в частности, массивность конструкции [11]. Но для того, чтобы возвращать ракеты из более дальних полетов и экономить при этом топливо, необходима морская платформа с элементами силовой гироскопической стабилизации. Многоразовый носитель ADELINЕ компании SPACE X для плавной посадки многотонной ракеты использует различного класса гироскопические приборы и устройства, и на их базе стабилизирующие и следящие системы автоматики.

3. Цель и задачи исследований

Целью исследований является раскрытие природы формирования резонансной обстановки в подвесе поплавкового гироскопа при эксплуатационном использовании летных изделий гиперзвуковой категории.

Поставленная цель подразумевает решение следующих задач:

- аналитически установить возможность возникновения резонансной ситуации в полиагрегатном подвесе двухстепенного гироскопа;
- в режиме полунатурных испытаний подтвердить опасность резонансных проявлений, вызванных дифракцией проникающего акустического излучения на подвесе гироскопа;
- предложить пассивные методы подавления влияния звуковых полей на погрешность гироскопа. Проанализировать эффективность резонансных решений для уменьшения погрешностей гироскопа в акустических полях циклической структуры.

4. Материалы и методы исследований

4. 1. Прогнозирование резонансной ситуации в поплавковом подвесе гироскопа

В качестве параметра, который позволит на расчетной модели прогнозировать опасность возникновения резонанса в подвесе гироскопа, выбрана звукопроницаемость, считая, что в этом случае стремящееся к бесконечности ее значение подразумевает беспрепятственное прохождение звуковых волн через корпус прибора в жидкостатическую часть подвеса гироскопа. Это послужит толчком к переходу взвешивающей жидкости из статического состояния в турбулентную фазу, которая всеми доступными средствами будет влиять на поверхность поплавка и на комплектующие элементы, создавая возмущающие моменты вдоль входной оси гироскопа и относительно оси его прецессии [12].

Строя расчетную модель в соответствии с промышленным образцом двухстепенного поплавкового гироскопа класса ДУСУ 2, удастся установить наличие трех резонансов – один на высоких частотах (выше

граничной частоты $f_{гр}$) и два на низких частотах (ниже граничной частоты).

Резонансную обстановку в подвесе на высоких частотах формируют изгибные колебания корпуса прибора, когда импеданс симметричным колебаниям намного больше импеданса антисимметричным колебаниям, т. е.

$$|Z_a| \ll |Z_c|. \tag{1}$$

Начиная с граничной частоты $f_{гр}$, при соответствующем подборе угла θ в плоскости шпангоута между нормалью \vec{k} поверхности корпуса прибора и волновым вектором \vec{k} , становится возможным волновое совпадение для изгибных волн

$$\lambda_b = \lambda_n \sin \theta, \tag{2}$$

где λ_b , λ_n – длина звуковой волны в воздухе и длина изгибной волны в корпусе, соответственно.

Каждой частоте ω звуковой волны соответствует свой угол совпадения

$$\theta_c^n = \arcsin \frac{c_b}{c_n}, \tag{3}$$

где c_n – фазовая скорость изгибных волн, c_b – скорость звуковых волн в воздухе. Для частоты $f=42$ кГц, например, угол совпадения составит

$$\theta_c^n = 10^\circ. \tag{4}$$

Наоборот, когда

$$|Z_c| \ll |Z_a| \tag{5}$$

и интенсивную перекачку звуковой энергии осуществляет окружающая волна (вдоль параллели), скорость которой не зависит от частоты излучения, значение угла совпадения составит

$$\theta_c^n = 5^\circ 10'. \tag{6}$$

Эти два значения угла θ наиболее опасны, так как способствуют трансляции энергии звуковой волны внутрь прибора практически без потерь.

Наконец, присутствует еще один резонанс на низких частотах $f \ll f_{гр}$. Он наступает при равенстве следа окружности шпангоута прибора и продольной волны на плоскость фронта падающей волны, т. е.

$$\frac{2\pi R}{\sin \psi} = \lambda_{\parallel} \sin \psi, \tag{7}$$

где $\lambda_{\parallel} = \frac{c_1}{f}$ – длина продольной волны, c_1 – скорость продольных волн в корпусе прибора из алюминия; ψ – угол между волновым вектором и радиусом R шпангоута в продольной плоскости корпуса прибора. Резонансные значения угла ψ для окружной волны приведены в табл. 1.

Таким образом, с уменьшением угла ψ падения ультразвукового луча снижается и частота совпадения f , на которой возможно возникновение волнового совпадения.

Таблица 1
Резонансные значения угла ψ для продольной (окружной) волны

$c_1=6400 \text{ мс}^{-1}$			
f, Гц	ψ , град	f, Гц	ψ , град
100	2°50'	2000	12°25'
200	4°00'	3000	15°45'
300	4°55'	6000	22°35'
400	5°45'	7000	24°30'
500	6°20'	8000	26°20'
600	7°00'	10000	29°40'
700	7°30'	20000	44°30'
800	8°05'	30000	59°10'
900	8°35'	40000	82°10'
1000	9°00'	–	–

4. 2. Полунатурные испытания ДУСУ 2 в поле ультразвукового луча

Соответствие датчика угловых скоростей унифицированного класса ДУСУ2-30В на функциональную готовность проводилось облучением оболочечной части корпуса прибора достаточно широким звуковым пучком. Датчик погружался, согласно требованиям на эксплуатацию ультразвуковой установки MINI ULTRASONIC CLEANER MODEL 3560 (CHINA), в наполненную водой ванночку и жестко фиксировался на штативе с помощью крепежа. Выходной сигнал прибора записывался измерительной аппаратурой для двух режимов – когда гироскоп выключен и при включенном гироскопе.

Сравнительный анализ реализаций выходного сигнала датчика дает возможность, с одной стороны, установить степень влияния ультразвукового пучка, собственно, на полиагрегатный подвес гироскопа, а с другой – определить степень влияния и динамику развития во времени погрешности $\Delta\omega$ измерений угловой скорости летательного аппарата при гиперзвуковом полете. Датчик ДУСУ устанавливался таким образом, чтобы поворотом корпуса прибора можно было бы выяснить наиболее опасное направление действия проникающего акустического излучения при летной эксплуатации.

После выхода гироскопа на тепловой режим, регистрировался, “ноль” выходного сигнала потенциометра в аналоговой форме и в количественном эквиваленте. Для удобства, “ноль” датчика угла записан в долях погрешности $\Delta\omega$ прибора.

Создание резонансной обстановки изгибной волной происходит при угле $\theta = 10^\circ 37'$ (в отличие от теоретических расчетов, когда $\theta_c^n = 10^\circ$) (рис. 1).

Как видно, погрешность прибора достигает 2,2 град с^{-1} и, естественно, встает вопрос о функциональной способности прибора.

4. 3. Звукоизоляция приборов пассивными методами

Пассивные методы подразумевают достижение требуемой звукоизоляции конструкторско-технологическими решениями.

Для примера был рассмотрен цилиндрический массогабаритный эквивалент прибора. Широкополосное акустическое нагружение в 165 дБ создавалось роторной динамической сиреной на установке “Сирена” Института проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины (рис. 2). Нагружение в 165 дБ соответствует старту РН с открытых стартовых позиций (рис. 3, кривая 1).

Внутри прибора, очевидно, проходит только часть акустического излучения (рис. 3, кривая 2). Если с зазором, на корпус прибора установить перевернутый цилиндрический стакан, выполняющий роль экрана, то уровень акустического давления в приборе уменьшится практически до Паспортных требований, т. е. до 130 дБ. Эффект шумогашения, благодаря объемной нелинейности, выполняет воздушная прослойка замкнутого пространства между корпусом и цилиндрическим стаканом (рис. 3, кривая 3).

Если внешний экран выполнить с продольными прорезями (щелями) заданного типоразмера, а на торце сделать такие же прорези, но радиальные, то уровень акустического давления в приборе понизится еще больше – в среднем до 115–120 дБ (рис. 3, кривая 4). А минимальное давление станет равным 113–114 дБ.

Таким образом, щелевой резонатор в виде замкнутой оболочки обеспечит “акустический комфорт” прибору (рис. 4).

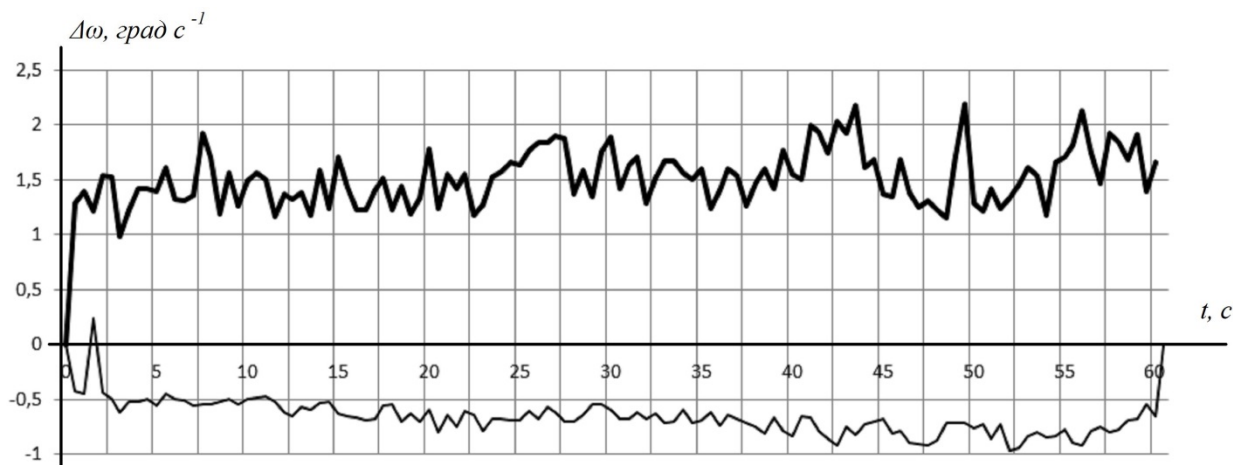


Рис. 1. Выходной сигнал ДУСУ при $\varphi = 0^\circ$: тонкая линия – $\theta = 0^\circ$; контурная линия – $\theta = 10^\circ 37'$

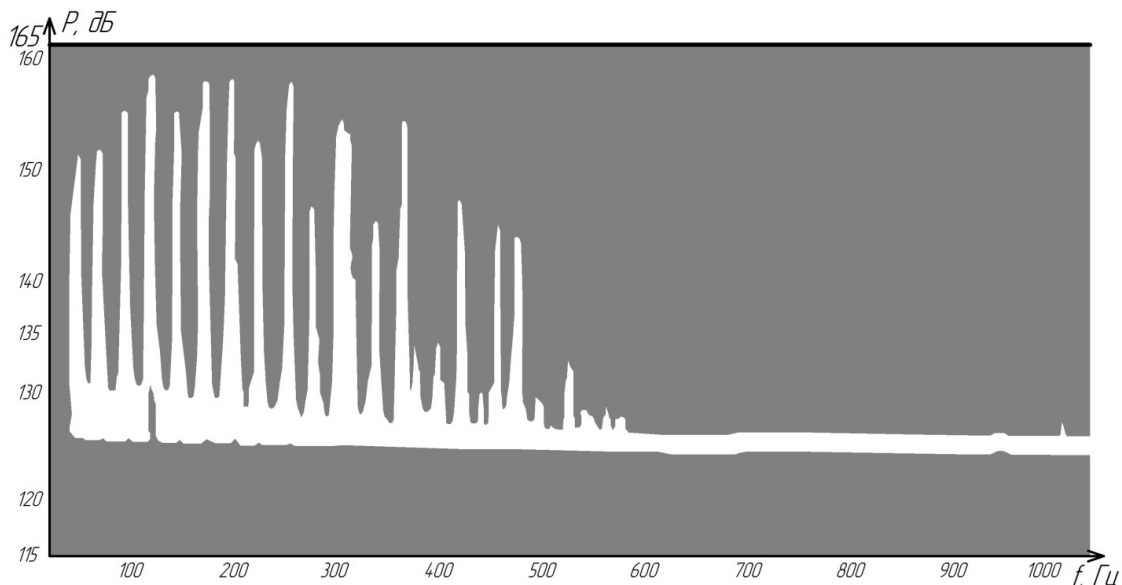


Рис. 2. Широкополосное акустическое нагружение в 165 дБ

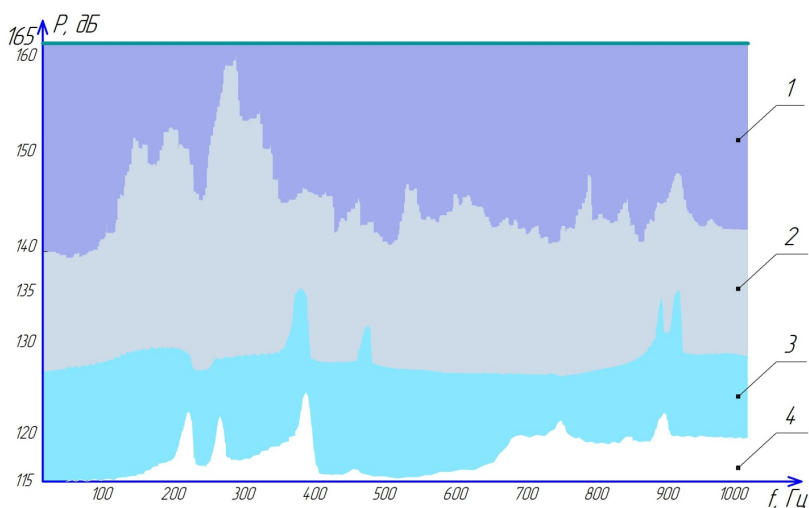


Рис. 3. Звукоизоляция пассивными методами: кривая 1 – внешнее акустическое воздействие; кривая 2 – звуковое давление внутри корпуса прибора; кривая 3 – экран в виде цилиндрического стакана; кривая 4 – щелевой резонатор

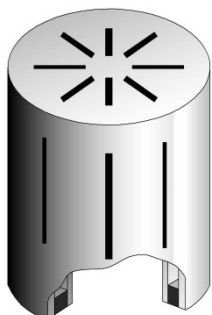


Рис. 4. Щелевой резонатор

Эффект понижения уровня звуковых волн осуществляется на резонансном уровне [14]. Резонирует воздушная прослойка между корпусом прибора и щелевым экраном. Решающую роль играет объемная нелинейность прослойки.

5. Обсуждение результатов исследований

Таким образом, в полиагрегатном подвесе гироскопа при определенных условиях могут возникать особенности резонансного типа [14]. С одной стороны, становится акустически прозрачным корпус прибора, с другой стороны – взвешивающая жидкость переходит из статического состояния в турбулентное, что совершенно недопустимо для гироскопа. Причем, повышенная энергетика может привести также к нарушению изотропности жидкости в виде формирования газовых пузырьков, которые под действием проникающего акустического излучения будут перемещаться в подвесе, нарушая исходное равновесие массовых и архимедовых сил [15].

Эксперимент показал, что наиболее эффективные – автокомпенсационные – методы уменьшения влияния внешних возмущений не дают результата. В лучшем случае, они только осредняют дополнительные погрешности, как например, при принудительном вращении подвеса вокруг оси, параллельной вектору кинетического момента либо при использовании метода двухканальности Петрова.

Дальнейшее подтвердило, что в борьбе с резонансными проявлениями в подвесе гироскопа эффективны только методы на основе также резонансных проявлений, в частности, использующих объемную линейность резонаторов.

7. Выводы

1. Построенные расчетные модели явления дают возможность оценить причины возникновения резо-

нансной ситуации в полиагрегатном подвесе гироскопа в эксплуатационных условиях гиперзвукового полета.

2. Полунатурные испытания прибора в поле ультразвукового луча с достаточной степенью точности подтвердили прогнозируемые условия возникновения резонансной ситуации в подвесе в виде волнового совпадения изгибных и окружных волн в корпусе прибора – теоретически прогнозируемый угол совпадения θ_c^n для изгибных волн составил 10° , а экспериментальные исследования дали значения $\theta_c^n = 10^\circ 37'$; для продольных (окружных) волн теоретически уста-

новленный угол совпадения составил $\theta_c^n = 5^\circ$, а экспериментально проверенное значение угла совпадения составило $\theta_c^n = 5^\circ 03'$.

3. Предложенные методы пассивной звукоизоляции, имеющие охранные документы Украины, подтвердили эффективность шумогашения на установке “Сирена” НАН Украины для условий запуска летательных аппаратов с открытых стартовых позиций, когда уровень акустического давления в районе реактивной струи достигает 165 децибел. Доказана эффективность резонансных проявлений для звукоизоляции приборов.

Литература

1. Мельник, В. Н. Волновые задачи в акустических средах [Текст]: монография / В. Н. Мельник, Н. В. Ладогубец. – Нац. техн. ун-т Украины “КПИ”; Нац. авиац. ун-т. – К.: “Корнейчук”, 2016. – 432 с.
2. Мельник, В. Н. Звуковий бар'єр і вплив потужної N-хвилі на пружні конструкції апаратів класу “Air to Air” [Текст] / В. М. Мельник, В. В. Карачун // Космічна наука і технологія. – 2012. – Т. 18, № 5. – С. 12–23.
3. Пат. 110171 на винахід, Україна, МПК G01C19/20 (2006.01). Поплавковий гіроскоп [Текст] / Мельник В. М., Карачун В. В. – Заявники і патентовласники: В. М. Мельник, В. В. Карачун. – № а 201410214; заявл. 17.09.14; опубл. 25.11.15, Бюл. № 2. – 1 с.
4. Проект разведывательно-ударного гиперзвукового БПЛА НТВ-3Х «Blackswift» (США) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://raigap.livejournal.com/261144.html>
5. Летательный аппарат Boeing X-51A WaveRider ставит рекорд по длительности полета на гиперзвуковой скорости [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dailytechinfo.org/space/4774-letatelnyy-apparat-boeing-x-51a-waverider-stavit-rekord-po-dlitelnosti-poleta-na-giperzvukovoy-skorosti.html>
6. «Надежная радиосвязь на гиперзвуковых скоростях возможна» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://zoom.cnews.ru/rnd/article/item/nadezhnaya_radiosvyaz_na_giperzvukovyh_skorostyah_vozmozhna/print
7. Winter, F. H. 100 years of flight: a chronicle of aerospace history, 1903-2003 [Text] / F. H. Winter, F. R. Van der Binder. – Reston, Virginia, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2003. – 524 p.
8. Barbour, N. M. Inertial Navigation Sensors [Text] / N. M. Barbour. – Cambridge, 2010. – 10 p.
9. Nwe, T. T. Application of an Inertial Navigation System to the Quad-rotor UAV using MEMS Sensors [Text] / T. T. Nwe et. al. // Engineering and Technology. – 2008. – Vol. 42. – P. 578–582.
10. Woodman, O. J. An introduction to inertial navigation [Text] / O. J. Woodman. – Cambridge, 2007. – 37 p.
11. Le Manh Hung, V. Indoor Navigation System for Handheld Devices [Текст] / V. Le Manh Hung. – Worcester, 2009. – 198 p.
12. Kulyk, M. S. Suborbital and Atmospheric Hypersound Technologies [Текст] / M. S. Kulyk, V. M. Mel'nyck, V. V. Karachun, N. V. Ladogubets. – NAU; NTUU “KPI”. Kyiv: “NAU”, 2015. – 328 p.
13. Декларацийний патент на винахід 39599А, Україна, МПК 6 G10K 11/16. Шумозахисний кожух [Текст] / Карачун В. В., Тривайло М. С., Мельник В. М. – Заявник і патентовласник НТУУ “КПІ” 2000116168; заявл. 01.11.2000; опубл. 15.06.2001, Бюл. № 5. – 1 с.
14. Заборов, В. И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций [Текст] / В. И. Заборов. – М.: Стройиздат, 1962. – 116 с.
15. Heng, M. Design of a NURBS Interpolator with minimal feed fluctuations and continuous feed modulation capability [Text] / M. Heng, K. Erkorkmaz // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2010. – Vol. 50, Issue 3. – P. 281–293. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.11.005