

УДК 629.0754

DOI: 10.15587/2312-8372.2017.118934

АНАЛИЗ СТЕПЕНИ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАСКИРОВКИ ПАЛУБНОЙ АВИАЦИИ ОТ РАЗВЕД-ДИВЕРСИОННЫХ ГЛАЙДЕРОВ ПУТЕМ ИСКУССТВЕННО ФОРМИРУЕМОЙ БУФЕРНОЙ ЗОНЫ

Карачун В. В., Мельник В. Н., Фесенко С. В.

1. Введение

Летные испытания гиперзвукового оружия дают основания для реального изменения облика современной войны и сделают практически беспомощными средства противовоздушной обороны (ПВО). В очередной раз военные технологии опередили время и ставят новые вопросы о безопасности миллиардов жителей *Земли* [1] (рис. 1).



Рис. 1. Гиперзвуковой летательный аппарат на боевом дежурстве

США и *Китай* работают над проектами гиперзвуковых глайдеров, которые получают первоначальное ускорение за счет подъема на большую высоту с помощью ракеты-носителя, а затем разгоняются во время управляемого спуска с больших высот. Преимущества подобной системы определяются несколькими моментами. Во-первых, большой дальностью, вплоть до глобального удара по любой точке поверхности *Земли*. Во-вторых, сравнительно простым устройством глайдера (нет маршевого двигателя). В-третьих, большой массой боевой части и, наконец, высокой скоростью полета, более 10 М.

Россия сосредоточилась на разработке ракет с гиперзвуковым прямоточным воздушно-реактивным двигателем (ГПВРД), которые могут запускаться с *Земли*, кораблей или боевых самолетов. Существует российско-индийский проект по разработке подобных систем оружия, так что к 2023 г. *Индия* также сможет войти в «Гиперзвуковой клуб». Преимущество гиперзвуковых ракет состоит в меньшей стоимости и большей гибкости применения, в отличие от глайдеров, запускаемых с помощью межконтинентальной баллистической ракеты (МБР) [1].

Гиперзвуковые летательные аппараты заходят на *цель* по относительно *пологой траектории*, находятся в воздухе короткое время и могут маневрировать. В большинстве сценариев современные системы ПВО не в состоянии за короткий промежуток времени обнаружить и поразить гиперзвуковую *цель*.

Отсюда очерчивается главная задача – максимально усложнить для разведки выявления и очерчивания приметности средств обороны. Это, в свою очередь, усложнит применение противником огнестрельного оружия. Используя известное утверждение «Удивить – значит победить», будет заложен надежный фундамент победы. Маскировка – это решающее средство для введения в заблуждение противника и главный фактор победной поступи.

Летательные аппараты располагаются на верхней палубе (*schavot*) авианосца. Соответственно, могут быть качественно, и в короткий срок выявлены и классифицированы средствами обнаружения глайдеров. Таким образом, «недремлющее око» противника, барражирующее в заданной зоне ожидания, имеет прекрасную возможность мгновенно отреагировать, уже с самого начала движения летных средств. Выполнить задачи на поражение тактической палубной и стратегической бомбардировочной авиации без лишней потери драгоценного времени. Фактор времени в боевых условиях является *определяющим*. Поэтому анализ технологической ситуации в воздухе является актуальным, так как это способствует уменьшению уровня технологических рисков в боевых условиях.

2. Объект исследований и его технологический аудит

Объектом исследований служит процесс упругого взаимодействия ультразвукового луча с ограждающим самолет цилиндрическим модулем в виде двух круговых оболочек одинаковой длины соосно соединенных своими торцами, герметический промежуток между ними заполненный жидкостью.

Облучение снаружи ультразвуковым лучом влияет на свойства ограждающего цилиндрического модуля, в частности, на возникновение локальных особенностей внешней оболочки, а также на изменение энергетического состояния жидкостатического промежутка между оболочками.

Расчетная модель соответствует техническому решению в виде ограждающего самолет цилиндрического модуля. Изучаемое явление – продукт обеспечения маскировки палубной авиации от воздушной разведки в предстартовом положении (вертикальный старт либо взлетно-посадочная полоса) в эксплуатационных условиях.

Одно из проблемных мест исследования заключается в том, что дислокация палубной авиации на открытой плоскости шкафута дает возможность средствам обнаружения суборбитальной и атмосферной разведки противника беспрепятственно определить не только начальные координаты, но также его координатные функции за весь период времени последующего движения по траектории. Наконец, бортовая аппаратура глайдеров, взяв эту информацию за исходную, позволяет с упреждением, достаточно точно, проводить обстрел теоретической траектории движения, увеличивая, тем самым, вероятность поражения цели.

Поэтому необходимо обеспечить стопроцентную маскировку палубной авиации на открытых стартовых позициях. Этот позволит существенным образом уменьшить, либо полностью исключить и повысить эффективность и продолжительность жизнеобеспечения летательного аппарата в целом.

3. Цель и задачи исследований

Целью проводимых исследований является оценка эффективности рассматриваемого технического решения для достижения полной (или частичной) маскировки и ограниченной приметности палубной авиации от воздушной разведки.

Задачи проводимых исследований состоят в следующем:

1. Построение расчетной аналитической модели выбранного технического решения в виде двух соосных оболочек, разделенных жидкостью и облучаемых снаружи ультразвуковым лучом.

2. Обоснование необходимости выполнения условия большого волнового размера поверхности наружной оболочки.

3. Выяснения условий необходимой степени аберрации звуковых волн, излучаемых в жидкость окружной волной наружной оболочки, и формирование поверхности каустики.

4. Определение угла падения ультразвукового луча на поверхность наружной оболочки, необходимого для возникновения резонансной обстановки в механической системе – волнового совпадения (геометрического резонанса).

4. Исследование существующих решений проблемы

Время неизбежно выделило решающие приоритеты в создании способов обороны и маскировки летных пилотируемых и беспилотных (летающих роботов) изделий. Маскировка (от фр. *masquer*) предполагает обеспечение частичной или полной незаметности, либо скрытности, материально-технических средств оборонного назначения, а также воинского состава. Маскировка обеспечивает внезапность действий войск, ударную и огневую мощь огневой техники, продление их боеготовности и повышению живучести. По масштабам применения и характеру решаемых задач маскировка подразделяется на – *стратегическую, оперативную и тактическую*. В зависимости от того, от каких технических развед-диверсионных средств осуществляются маскировочные мероприятия, различают маскировку:

- оптическую (маскировочное окрашивание) [2];
- тепловую, радиолокационную [3];
- радио и радиотехническую;
- звуковую (акустическую – прямой локации и эхо-локации);
- средства специальной гидроакустики (подкильные станции, опускаемые и буксируемые контейнеры с антеннами переменной глубины) и др. [4]. Основными способами маскировки являются скрытие, имитация и демонстративные действия.

Скрытие заключается в устранении или ослаблении демаскирующих признаков. Скрытие обеспечивается соблюдением маскировочной дисциплины, использованием маскирующих свойств местности, естественных условий и применением специальных инженерно-технических приёмов и средств.

Имитация заключается в создании ложных объектов и ложной обстановки путём использования макетов техники и других средств [3].

В 1932 году в Управлении военных изобретений (СССР) предложено сделать самолеты невидимыми в воздухе для наземного наблюдателя, т. е. создать зеркальную маскировку, а также провести работы по защите металлов от коррозии [5].

Предлагается также проводить скрытие объектов с помощью дымомакировки (аэрозольные образования) – дымовые завесы применяются для скрытия объектов от визуально-оптических средств противника. Для исключения определения точного месторасположения объекта применяются дымовые завесы, в несколько раз превышающие размеры объекта. Для оценки эффективности маскировки с помощью дымов необходимо учитывать метеорологические условия (скорость и направление ветра, осадки), а также характер местности (рельеф, растительный покров, реки, озёра, населённые пункты) [6].

Развитие подходов к радиолокационной невидимости привело к созданию самолетов-невидимок на основе технологии типа «Стелс» [7]. Однако эта технология не стала решением проблемы и необходимы более глубокие исследования и оригинальные подходы для достижения поставленной цели – скрытности боевой машины. Маскировка самолета с помощью создания помех и отражений – это метод скорее вспомогательный, поскольку не может решить задачу «исчезновения» самолета с радаров противника. Российскими исследователями была предложен свой метод для маскировки самолета — активный метод. Если в американской технологии «Стелс» для снижения радиовидимости используются специальные поглощающие покрытия, то здесь задействована своя технология, которая для тех же целей использует искусственное плазменное образование, полученное с помощью выброса в атмосферу электронных пучков. Вблизи самолета создаются плазменные облака, которые активно поглощают электромагнитную волну, благодаря чему видимость самолета на экране радара падает более чем в 100 раз [8].

Таким образом, принимая во внимание, что самолеты тактической палубной авиации базируются на открытых стартовых позициях, проистекают особенности и специфика средств маскировки самолетов от воздушной разведки противника. Известные пути решения задач маскировки и ограниченной приметности контуров летных изделий, основанные на пассивных методах, позволяют прийти к выводу, что наиболее перспективными являются все же средства, основанные на резонансных явлениях различной физической природы.

В последнее время, с помощью компьютерного моделирования, используют интенсивность для прогнозирования распределения звука в замкнутых пространствах для представления звука, излучаемого из различных источников звука. Это дает возможность уменьшать объем информации, подлежащей вычислению, и делает систему моделирования достаточно простой для представления на настольном компьютере. С появлением новых компьютерных технологий теперь стало практичным моделировать распределение звука с использованием давления, включая информацию о фазе, в пустых замкнутых пространствах [9]. Также рассматриваются возможности моделирования, используя методы трансформации оптики для слоев изгибных

волн в пределах удлиненных стержневых конструкций [10]. Используют передачу звука через двойные стенки цилиндрической оболочки с подкладкой пароупругого материала в активной зоне, которая возбуждает колебания давления из-за внешнего турбулентного пограничного слоя [11]. Предлагается использовать акустику конформной трансформации для создания камуфляжных устройств со слоистыми однородными структурами, которые могут акустически генерировать иллюзии объектов [12]. Основываясь на оптическом преобразовании, предлагается использование камуфляжного покрытия, которое может маскировать произвольный объект, имитируя электромагнитное рассеяние пустой V-образной полости под металлической поверхностью. Это камуфляжное устройство будет вводить в заблуждение и путать детекторы и людей, и, следовательно, любой объект, скрытый под этим камуфляжным покрытием, не будет восприниматься [13]. В качестве иллюзии радиолокационной сети рассматривают способ когерентного фантомного трека посредством управления несколькими электронными боевыми транспортными средствами [14]. В работе анализируется влияние дисперсии электромагнитных параметров и толщины на характеристики поглощающего материала [15].

5. Методы исследований

Основой испытательного стенда является погруженный блок ультразвуковых излучателей марки УЗП-6-1 (Украина), который формирует ультразвуковой луч частотой 42 кГц с плоским фронтом, мощностью 300 Вт и интенсивностью ультразвуковых колебаний $1,65 \text{ Вт/см}^3$.

Внутри, заполненного водой, корпуса испытательного стенда, расположен цилиндрический модуль в виде двух круговых оболочек, разделенных жидкостью.

Экспериментальная установка состоит из ультразвукового генератора и ультразвукового преобразователя (рис. 2). Ультразвуковой преобразователь представляет собой погружной блок, который устанавливается в емкости с рабочей жидкостью.



Рис. 2. Экспериментальная установка:
а – ультразвуковой генератор; *б* – ультразвуковой преобразователь

Ультразвуковой преобразователь изготовлен из нержавеющей стали и состоит из 6 ультразвуковых излучателей, которые преобразовывают электрическую энергию в ультразвуковые колебания. Погружной блок соединен с ультразвуковым генератором и установлен в емкости, и полностью покрыт рабочей жидкостью.

6. Результаты исследований

При отсутствии облучения ультразвуковым лучом наружной оболочки ограждающего цилиндрического модуля в виде двух круговых оболочек на экране сенсора пеленгатора глайдера проявляются четкие изображения самолета тактической палубной авиации (рис. 3, а). Для получения требуемого эффекта маскировки под защитой поверхности зоны каустики необходимо выполнение двух условий. Во-первых, значительный волновой размер наружной оболочки ограждающего цилиндрического модуля в виде двух круговых оболочек. Во-вторых, подбор угла совпадения луча ультразвукового генератора [16, 17].

Первое условие позволяет при значительном волновом размере, т. е. большим нескольких единиц, рассматривать элемент наружной оболочки ограждающего цилиндрического модуля в виде двух круговых оболочек как пластину, которая излучает в межоболочечную жидкость звуковую волну. Явление абберации можно регулировать соответствующим подбором материала наружной оболочки и жидкости. Необходимо, чтобы соотношение скоростей распространения звука в них давали возможность построить зоны каустики в виде конфокальной поверхности оболочки ограждающего цилиндрического модуля в виде двух круговых оболочек заданного радиуса. Очевидно, что при незначительном значении волнового размера механизм построения изолирующей поверхности не будет срабатывать. На рис. 3, б продемонстрировано изначальное изменение приметности контуров самолета тактической палубной авиации. Эти изменения, как видно, еще не носят принципиального характера, вместе с тем имеют место.

Подбирается угол падения ультразвукового луча на поверхность наружной оболочки ограждающего цилиндрического модуля в виде двух круговых оболочек до значений угла совпадения, т. е. до наступления геометрического резонанса в виде волнового совпадения. Это позволяет далее развить искажения корпуса на экране пеленгатора глайдера самолета тактической палубной авиации (рис. 3, в). Это достигается за счет того, что турбулентность и энергетическая активность межоболочечной жидкости в условиях резонанса вырастает до такого уровня, когда приметность контуров практически исчезает и обеспечивается удовлетворительная маскировка самолета тактической палубной авиации от средств пеленгации глайдера. Механизм этого явления обусловлен резким увеличением мощности ультразвукового луча, прошедшего внутрь и генерируемого им звуковых волн вследствие наступления так называемой акустической прозрачности наружной оболочки ограждающего цилиндрического модуля в виде двух круговых оболочек [18–20].

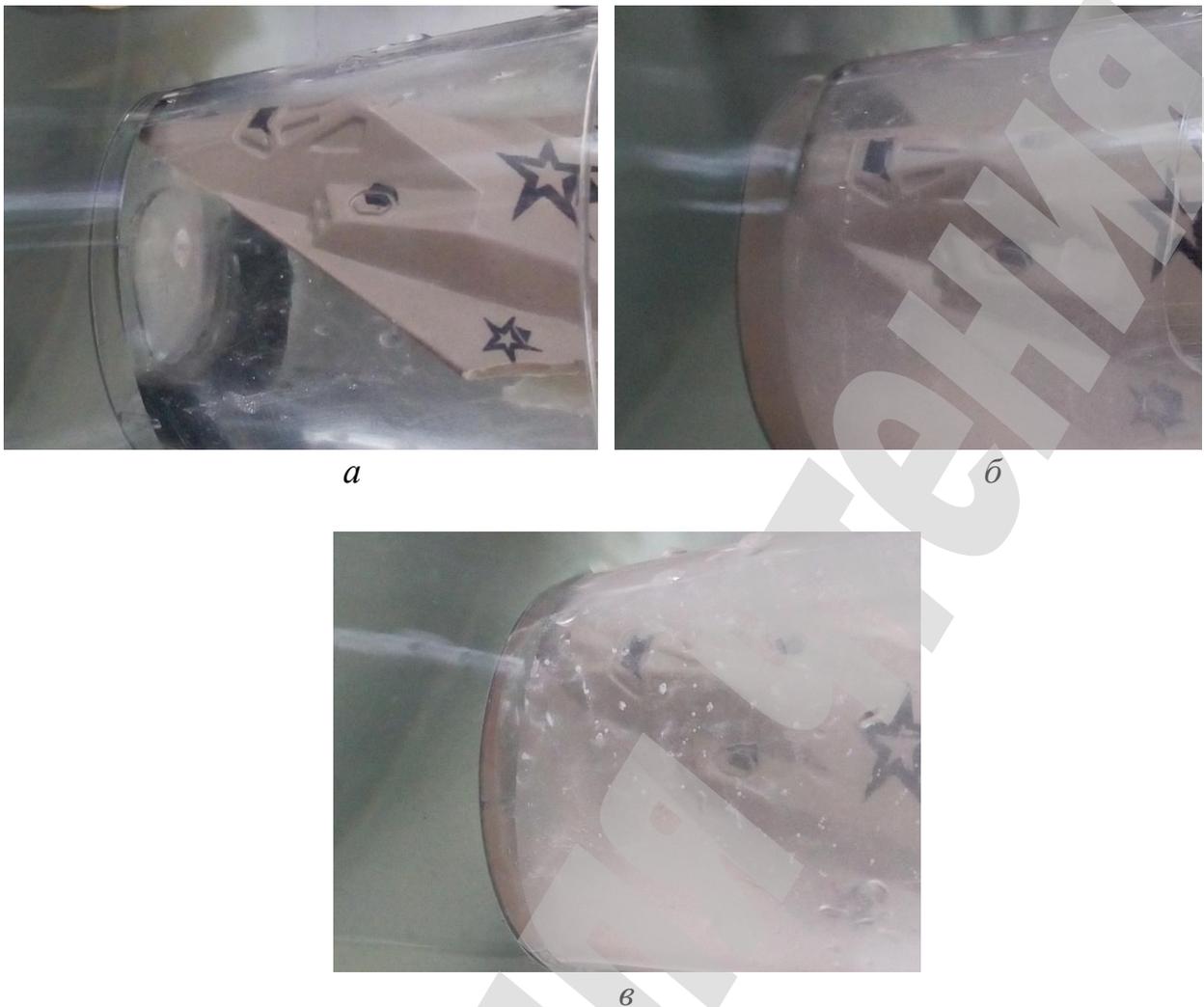


Рис. 3. Изображение исследуемого образца самолета: *а* – исходное положение, облучение ультразвуковым лучом ограждающего цилиндрического модуля в виде двух круговых оболочек отсутствует; *б* – при внешнем искусственном акустическом излучении ограждающего цилиндрического модуля в виде двух круговых оболочек (вне зоны резонанса); *в* – на экране сенсора пеленгатора глайдера при наступлении резонансной обстановки в межоболочечном пространстве – волновое совпадение

В момент старта самолетов тактической палубной авиации ограждающий модуль отодвигается, освобождая место для вертикального старта самолета. По возвращении самолета на базу и посадки на палубу авианосца ограждающий цилиндрический модуль возвращается в исходное положение, закрывая при этом полностью самолет и выполняя при этом свою основную направленность – обеспечение маскировки летного аппарата.

Оригинальной стороной полученных результатов полунатурных испытаний является подтверждение теоретических предпосылок технической реализации искусственного формирования буферной зоны в жидкости межоболочечного пространства ограждающего модуля в виде зон каустики (рис. 4) для маскировки самолета палубной авиации.

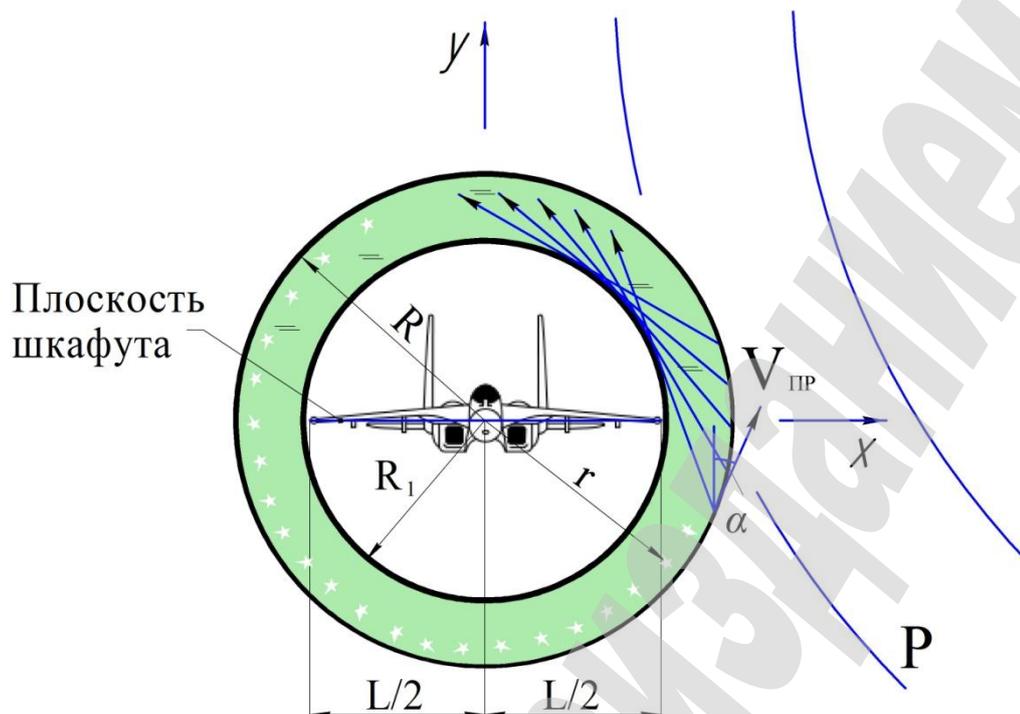


Рис. 4. Искусственное формирование в межоболочечном пространстве буферной поверхности в виде зоны каустики

Для конкретности, примем:

- размах крыльев самолета $L=15$ м;
- радиус внутренней оболочки $R_1=7,5+0,05=7,55$ м;
- радиус наружной оболочки $R=R_1+0,1=7,55+0,1=7,65$ м.

Оболочки предполагаем выполненными из дюралюминия ($V_{np}=6300-5230$ м/с, $V_{mн}=3080$ м/с), в качестве жидкости примем пресную воду ($c_0=331$ м/с при $t=20$ °С), считаем волной размер поверхности наружной оболочки намного превышающим единицу, т. е.:

$$kR \gg 1,$$

где $k = \frac{\omega}{c}$, k – волновое число; ω – круговая частота ультразвукового излучения в кГц; c – скорость звука в воздухе.

Это допущение позволяет рассматривать элемент поверхности наружной оболочки как плоский, в котором окружная волна в наружной оболочке генерирует в жидкость плоскую звуковую волну. Так как скорость звука в оболочке и жидкости разная, будет наблюдаться эффект абберации, излучаемых звуковых волн от окружной волны на угол α , т. е.

$$\sin \alpha = \frac{c_{жид}}{V_{np}} \approx 0,06 \text{ рад [17]}. \text{ Отсюда, } \alpha = 3^\circ 41'.$$

Как следует из рис. 3, излучаемые наружной оболочкой звуковые волны сформируют цилиндрическую поверхность зоны каустики радиусом $R = 7,65 \cos \alpha = 7,63$ м.

Эта зона будет представлять собой энергетически активную жидкую субстанцию, в которой вместо исходного статического состояния присутствует мощная турбулентность с кавитационными проявлениями. Степень турбулентности будет повышаться с приближением направления волнового вектора \vec{k} к значению угла совпадения, когда след падающей ультразвуковой волны и окружной волны в оболочке будут совпадать. В этом случае наблюдается так называемое, явление *акустической прозрачности* наружной оболочки и внешний ультразвуковой луч проходит внутрь оболочки без диссипации энергии. В окрестностях зоны волнового совпадения турбулентность будет иметь место, но существенно менее интенсивное. Таким образом, искусственно формируемая зона каустики радиуса r создаст буферную поверхность прохождению лучей средств локации. По мере приближения к зоне волнового совпадения, контуры изображения самолета на экранах средств локации будут постепенно размываться. В итоге превратятся в размытое пятно, подобно кляксе (рис. 3, в).

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Проведенные полунатурные испытания на макете самолета палубной авиации позволяют:

- оценить перспективность предлагаемого метода маскировки летных аппаратов на открытых стартовых позициях;
- глубоко проанализировать технологию искусственного формирования зоны каустики в предположении вариативных значений скорости распространения звука в наружной оболочке цилиндрического модуля и в разделяющей оболочке жидкости.

Проведенная в этой связи оценка радиуса цилиндрической зоны каустики в функции аберрации, излучаемых наружной оболочкой в жидкость, на частотах ниже граничной, звуковых волн дает подтверждение теоретическим предпосылкам искусственного регулирования радиуса зоны каустики – ближе к поверхности наружной оболочки или дальше.

Зона каустики представляет собой поверхность повышенной энергетической активности межоболочечной жидкости – от низкой кинетической энергетике жидкости до высокой. Она включает значительную турбулентность и кавитационные пузырьки, а также наличие температурного скачка в жидкости. Проанализировано влияние волнового совпадения окружных волн наружной оболочки и падающей звуковой волны искусственного ультразвукового облучения. Показано, что при подходе к резонансной области стремительно увеличиваются локальные особенности состояния жидкости. С наступлением равенства следа окружной и падающей ультразвуковой волн формируется физическое состояние наружной оболочки, как *акустически прозрачной* поверхности, а жидкость из исходно статического состояния превращается в высоко турбулентную структуру с наличием кавитационных пузырьков и градиента тепла. Последний тезис является наиболее существенным в предлагаемой схеме. Здесь акустически прозрачная наружная оболочка не оказывает влияния на качество изображения на экране

средств локации. Далее, высокотурбулентная жидкость воспроизведет на экране расплывчатое мутное пятно, подобное кляксе, не дающее возможности даже приближенно очертить контуры и, тем более, провести классификацию определяемого объекта.

Проведенные исследования позволяют признать предлагаемое техническое решение как несомненное средство повышения эффективности использования тактической палубной авиации и стратегической бомбардировочной авиации во время военных действий на море. В том числе, в случае ассиметричных военных действий, по охране территориальных рубежей государства.

Weaknesses. Очевидно, что необходимость обеспечения функциональных требований предлагаемой схемы, связанных с перемещением модуля вдоль плоскости шкафута и дальнейшая транспортировка его в подпалубное помещение, усложняет работу, увеличивает потребление энергетических и материальных средств механизма авианосца в целом. Особенно в эксплуатационных условиях повышенной бальности волнения поверхности моря, а также ураганного ветра, порождающего технологические риски, вследствие значительной парусности.

Opportunities. Повышение уровня маскировки палубной авиации позволит повысить эффективность и рациональное использование всех видов боевой техники, что, в целом, по флоту повысит сохранность авиационной техники, с одной стороны, а также боевого обеспечения огневой мощи вооружения.

Threats. Иностраные специалисты и идеологи боевой и огневой техники, в той или иной мере, также стали использовать явление волнового совпадения и связанные с ним локальные проявления состояния систем на резонансном уровне. Например, для сухопутной огневой техники – танки, БТР, бронетранспортеры, самоходные орудия, зенитные и ракетно-минометные установки. Подобное использовалось военными США в Афганистане с помощью укрытия боевых машин «лесом» нанотрубок.

8. Выводы

1. Построена расчетная модель предлагаемого технического решения по маскировке палубной авиации, которая позволяет глубоко анализировать особенности изучаемого явления и обеспечить стопроцентное искажение изображение летательного аппарата на экранах локаторов.

2. Показано, что обеспечение большого волнового размера поверхности наружной оболочки служит основой превращения элемента внутренней поверхности оболочки в плоский фрагмент, излучающий звуковую волну в жидкость межоболочечного пространства. Выбор материала оболочки и жидкости соответствующим образом может корректировать величину и соосное расположение в модуле буферной зоны.

3. Выяснено, что необходимость выполнения условия большого значения волнового размера является следствием необходимости представления элементов наружной оболочки ограждающего цилиндрического модуля в виде совокупности плоских элементов. Это достигается либо увеличением радиуса наружной оболочки, либо изменением соответствующих скоростей звука в

оболочке и разделяющую оболочки жидкости, либо и того и другого фактора одновременно. В этом случае обеспечивается излучение теперь уже плоским элементом оболочки ограждающего цилиндрического модуля внутрь жидкости и звуковых волн с определяемой степенью аберрации.

Достижение большого волнового размера наружной оболочки ограждающего цилиндрического модуля подтверждает правомочность предоставлением элементарного отрезка ее поверхности в виде пластины. Это позволяет воспользоваться известными соотношениями наступления резонансной обстановки взаимодействия акустической волны и пластины в виде волнового совпадения и формирования условия акустической прозрачности преграды, когда энергия ультразвукового луча будет практически без потерь (без диссипации) проходить в межоболочечную акустическую среду.

4. Показано, что изменение состава физических свойств разделяющей жидкости и материала внешней оболочки ограждающего цилиндрического модуля определяют угол отклонения излучаемых в жидкость звуковых волн в виде соотношения $\sin \alpha = \frac{c}{V}$ [10].

Література

1. Гиперзвуковая война пугает неопределенностью [Электронный ресурс] // Zoom.CNews. – 24 февраля 2015. – Режим доступа: \www/URL: http://zoom.cnews.ru/rnd/article/item/giperzvukovaya_vojna_pugaet_neopredelennostyu/print/
2. Общие положения о маскировке самолетов [Электронный ресурс] // Военная энциклопедия «Армии и Солдаты». – 2017. – Режим доступа: \www/URL: <http://armedman.ru/stati/obshhie-polozheniya-o-maskirovke-samoletov.html/>
3. Маскировка от радиолокационных средств разведки [Электронный ресурс] // Буквы.Ру Научно-популярный портал. – 2017. – Режим доступа: \www/URL: <http://bukvi.ru/bgd/osnovy-maskirovki-ot-razvedki-protivnika.html/>
4. Гордеев, Н. П. Маскировка в боевых действиях флота [Текст] / Н. П. Гордеев. – Москва, 1971. – 160 с.
5. Зеркальный самолет инженера И. И. Варшавского. Угол отражения [Электронный ресурс] // Альтернативная История. – 2011. – Режим доступа: \www/URL: <http://alternathistory.com/zerkalnyi-samolet-inzhenera-ii-varshavskogo-ugol-otrazheniya/>
6. Королёв, А. Ю. Маскировка вооружения, техники и объектов [Текст]: уч. пос. / А. Ю. Королёв, А. А. Королёва, А. Д. Яковлев. – СПб.: Университет ИТМО, 2015. – 155 с.
7. Технология Стелс. Коротко и ясно [Электронный ресурс]. – Avia.Pro, 2014. – Режим доступа: \www/URL: <http://avia.pro/blog/tehnologiya-stels-korotko-i-yasno/>
8. Заводсков, А. С. Крылатые тени. Методы защиты самолета от радиолокационного обнаружения [Текст] / А. С. Заводсков, Р. А. Коротченко // Юный ученый. – 2016. – № 3. – С. 132–136. – Режим доступа: \www/URL: [URL:http://yun.moluch.ru/archive/6/474/](http://yun.moluch.ru/archive/6/474/)
9. Dance, S. M. Computer prediction of sound distribution in enclosed spaces using an interference pressure model [Text] / S. M. Dance, J. P. Roberts,

B. M. Shield // *Applied Acoustics*. – 1995. – Vol. 44, No. 1. – P. 53–65. doi:[10.1016/0003-682x\(94\)p4419-7](https://doi.org/10.1016/0003-682x(94)p4419-7)

10. Zhou, J. Sound transmission through double cylindrical shells lined with porous material under turbulent boundary layer excitation [Text] / J. Zhou, A. Bhaskar, X. Zhang // *Journal of Sound and Vibration*. – 2015. – Vol. 357. – P. 253–268. doi:[10.1016/j.jsv.2015.07.014](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.07.014)

11. Morvaridi, M. Perfectly matched layers for flexural waves: An exact analytical model [Text] / M. Morvaridi, M. Brun // *International Journal of Solids and Structures*. – 2016. – Vol. 102–103. – P. 1–9. doi:[10.1016/j.ijsolstr.2016.10.024](https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2016.10.024)

12. Ren, C. Camouflage devices with simplified material parameters based on conformal transformation acoustics [Text] / C. Ren, Z. Xiang // *Applied Mathematical Modelling*. – 2014. – Vol. 38, No. 15–16. – P. 3774–3780. doi:[10.1016/j.apm.2013.12.005](https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.12.005)

13. Wang, S.-Y. A v-shaped cavity camouflage coating [Text] / S.-Y. Wang, S.-B. Liu, Y.-N. Guo, C. Ghen // *Optics & Laser Technology*. – 2013. – Vol. 45. – P. 666–670. doi:[10.1016/j.optlastec.2012.05.014](https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2012.05.014)

14. Xu, Y. Virtual motion camouflage based phantom track generation through cooperative electronic combat air vehicles [Text] / Y. Xu, G. Basset // *Automatica*. – 2010. – Vol. 46, No. 9. – P. 1454–1461. doi:[10.1016/j.automatica.2010.05.027](https://doi.org/10.1016/j.automatica.2010.05.027)

15. Yu, X. An optimizing method for design of microwave absorbing materials [Text] / X. Yu, G. Lin, D. Zhang, H. He // *Materials & Design*. – 2006. – Vol. 27, No. 8. – P. 700–705. doi:[10.1016/j.matdes.2004.12.022](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.12.022)

16. Заборов, В. И. Теория звукоизоляции ограждающих конструкций [Текст]: монография / В. И. Заборов. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1969. – 187 с.

17. Шендеров, Е. Л. Волновые задачи гидроакустики [Текст]: монография / Е. Л. Шендеров. – Л.: Судостроение, 1972. – 352 с.

18. Карачун, В. В. Задачі супроводу та маскування рухомих об'єктів [Текст]: монографія / В. В. Карачун, В. М. Мельник. – К.: Корнійчук, 2011. – 264 с.

19. Мельник, В. Волновые задачи в акустических средах [Текст]: монография / В. Мельник, Н. Ладогубец. – К.: Корнейчук, 2016. – 432 с.

20. Мельник, В. Н. Возникновение резонанса в акустической среде подвеса поплавкового гироскопа [Текст] / В. Н. Мельник, В. В. Карачун // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2016. – Т. 1, № 7 (79). – С. 39–44. doi:[10.15587/1729-4061.2016.59892](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.59892)