

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА «БЛИЖНЕЙ ЗОНЫ «ПРЯМОГО» АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ» ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ НА СТОЙКОСТЬ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ПУСКОВОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ АЭРОАКУСТИЧЕСКОГО ТИПА

М. Ю. Либерман

*Рассмотрены проблемы, связанные с проведением наземных испытаний изделий ракетно-космической техники (РКТ), в частности космических аппаратов (КА), на стойкость к воздействию пусковой акустической нагрузки. Отмечены проблемы, связанные с проведением испытаний изделий РКТ на стойкость к воздействию диффузного акустического поля, формирующегося в реверберационной камере. Представлен альтернативный метод испытаний изделий РКТ, размещённых в «прямом» акустическом поле: метод Direct field acoustic testing (DFAT). Кроме того, рассмотрен новый метод акустических испытаний изделий РКТ, размещённых в ближней зоне «прямого» акустического поля Direct near field acoustic testing (DNFAT). Отмечены основные преимущества методов DFAT и DNFAT по сравнению с методом испытаний в диффузном акустическом поле (т. е. в реверберационной камере). Представлен анализ методических особенностей применения метода DNFAT для проведения испытаний РКТ и основных различий при проведении испытаний с применением методов DFAT и DNFAT.*

*Ключевые слова:* ближняя зона акустического поля, «прямое» акустическое поле, диффузное акустическое поле, пусковая акустическая нагрузка, КА, отсек головного обтекателя (ГО), псевдозвуковые пульсации давления, неоднородные акустические волны.

**Введение.** Как известно из [1], одним из основных источников динамического нагружения КА являются пусковые динамические нагрузки аэроакустического типа, обусловленные воздействием на корпус отсека ГО ракеты-носителя (РН) акустических волн высокой интенсивности. На этапе пуска РН при истечении из сопла реактивного двигателя (РД) газовой струи (со скоростью, достигающей 3 км/с) отрыв пограничного слоя от внутренней поверхности сопла сопровождается интенсивным вихреобразованием. При этом излучаются интенсивные акустические волны, которые в результате отражения от пусковой установки и стартовой площадки попадают на корпус ГО и оказывают на него динамическое воздействие.

Динамическое нагружение аппаратуры, размещённой на платформе в приборном отсеке ГО, а также лёгких навесных устройств КА (антенн, солнечных батарей) может привести к их повреждению. Поэтому в ходе наземных испытаний КА предусмотрено проведение испытаний на стойкость КА к воздействию акустических волн высокой интенсивности.

Для проведения наземных стендовых испытаний изделий РКТ на стойкость к акустическим воздействиям наиболее широкое распространение получил метод испытаний, основанный на размещении изделия в диффузном (т. е. однородном и изотропном) акустическом поле, которое формируется в реверберационной камере [2]. «Реверберационный» метод

акустических испытаний (Reverberant Field Acoustic Testing – RFAT) используется в РФ, в частности, для проведения акустических испытаний изделий РКТ в АО «РКК «Энергия», а также в ФНЦ «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского (ЦАГИ)» – для акустических испытаний авиационной техники.

К основным преимуществам этого метода можно отнести высокую степень стабильности условий испытаний, поскольку изделие размещается в диффузном (т. е. однородном и изотропном) акустическом поле. Кроме того, при размещении в диффузном поле отсека ГО, в котором закреплён КА, звуковые волны оказывают воздействие на корпус ГО практически во всех возможных направлениях. При этом обеспечиваются условия возбуждения (под воздействием акустической нагрузки) практически всех мод собственных колебаний корпуса ГО.

Во время реального пуска звуковые волны, которые излучаются при истечении газовой струи из сопла РД, могут оказывать динамическое воздействие на корпус ГО только в результате отражений этих волн от пусковой площадки и пусковой установки. Поэтому звуковые волны могут воздействовать на корпус ГО под различными углами, значения которых невозможно точно спрогнозировать. В то же время в диффузном акустическом поле волны оказывают динамическое воздействие на корпус ГО под всеми возможными углами, и вслед-

ствии этого на стенде (в реверберационной камере) имитируются все реальные пусковые динамические воздействия на корпус ГО. При этом непосредственно на корпус КА оказывает динамическое воздействие локальное акустическое поле, которое формируется в объёме отсека ГО (в пространстве между корпусами ГО и КА) вследствие излучения звуковых волн вибрирующим корпусом ГО.

Однако следует учитывать возможность возбуждения в реверберационной камере стоячих волн на собственных частотах камеры. Вследствие возбуждения собственных мод колебаний (преимущественно в области низких частот) нарушается однородность поля в камере (в особенности в случае использования камер, имеющих форму прямоугольного параллелепипеда).

Поэтому, в соответствии с международным стандартом [2], рекомендуется использовать для испытаний реверберационные камеры неправильной (в частности трапециевидной) формы: т. е. все ограждающие конструкции (пол и потолок; противоположащие стены) не должны быть параллельны друг другу.

Следует также отметить, что практическая реализация этого метода (RFAT) сопряжена со значительными затратами, в частности, на строительство реверберационной камеры и на приобретение дорогостоящих источников шума (акустического излучения) высокой интенсивности, с помощью которых в камере формируется диффузное акустическое поле с высокими уровнями звукового давления. Кроме того, если поместить КА в диффузное акустическое поле, то на стенде не будут воспроизведены условия, имитирующие воздействие акустической нагрузки на КА в натуральных условиях. В реальных условиях КА размещён в отсеке ГО, при этом в щелевидном пространстве между корпусами ГО и КА формируется неоднородное локальное акустическое поле, структура которого принципиально отлична от структуры диффузного (т. е. однородного и изотропного) поля, формирующегося в реверберационной камере.

Поэтому для проведения в реверберационной камере корректных стендовых испытаний КА на стойкость к воздействию пусковой акустической нагрузки следует в обязательном порядке размещать КА в отсеке ГО (при этом может использоваться как реальный отсек ГО, так и макет отсека ГО).

Однако обычно предприятия, которые изготавливают КА, непосредственно не связаны с предприятиями, производящими РН (в том числе отсек ГО).

Поэтому на практике при проведении испытаний КА в реверберационной камере предприятию,

производящему КА, достаточно сложно получить отсек ГО или его макет (для размещения в нём КА во время наземных стендовых испытаний).

В соответствии с изложенным, проведение испытаний КА в реверберационной камере сопряжено с определёнными сложностями. Поэтому для проведения испытаний КА на стойкость к акустическим воздействиям специалистами проводятся исследования, целью которых является разработка ряда альтернативных методов стендовых испытаний.

В частности, ряд российских специалистов предлагает в рамках программы наземных стендовых испытаний заменить реальное акустическое воздействие на КА смоделированным вибрационным воздействием [3, 4], которое по своему динамическому воздействию на КА эквивалентно акустическому воздействию (или превосходит его).

Однако, согласно [5], при использовании такого метода моделирования нагрузки аэроакустического типа (основанного на использовании вибростендов в качестве источника динамической нагрузки) практически невозможно обеспечить полную тождественность (*test like you fly*) воздействия на изделие натурной (реальной) и стендовой нагрузок.

В то же время зарубежные специалисты активно занимаются совершенствованием методов стендовых испытаний, основанных на использовании именно акустических полей для имитации реальной пусковой динамической нагрузки, оказывающей воздействие на КА.

В частности, одним из возможных альтернативных методов испытаний на стойкость к воздействию акустической нагрузки является метод, основанный на размещении изделия (КА) не в диффузном поле, а в «прямом» акустическом поле.

Начиная с 90-х годов прошлого века, специалисты ряда научно-исследовательских центров NASA (США) приступили к разработке нового альтернативного метода испытаний изделий РКТ на стойкость к воздействию акустических волн высокой интенсивности. Речь идёт о методе DFAT, т. е. о методе испытаний КА в «прямом» акустическом поле. По результатам этих работ в 2016 г. было опубликовано специальное техническое руководство NASA [6], посвящённое описанию метода DFAT. Данный метод основывается на использовании «прямого» акустического поля (*Direct Field*) для стендового моделирования динамического нагружения КА на этапе пуска РН [6].

Для проведения стендовых испытаний КА на основе метода «прямого» поля используется не дорогостоящая реверберационная камера (в которой формируется диффузное акустическое поле), а

обычное измерительное помещение. В состав экспериментальной установки (для проведения испытаний на основе метода DFAT) входят акустические колонки (в качестве источников акустического излучения) вместо обычно используемых в реверберационных камерах электропневматических источников звука высокой интенсивности (создающих в камере поле с уровнями звукового давления 140 – 160 дБ).

Конструктивно акустические колонки образуют кольцевой источник звука: они расположены вокруг испытываемого изделия вдоль окружности с диаметром около 5,5 м, причём расстояние от колонок до центра изделия составляет 2,6 – 2,9 м [6].

Как известно, в соответствии с теорией акустических явлений в помещениях, поле звуковых волн, излучаемых источником звука, подразделяется на «прямое» поле и поле отражённых (от ограждающих поверхностей помещения) звуковых волн.

В непосредственной близости от источника звука доминирует «прямое» акустическое поле, которое формируется именно вследствие излучения звуковых волн источником звука (влиянием волн, отражённых от ограждающих поверхностей помещения, на характеристики звукового поля в этой области объёма помещения можно пренебречь).

При использовании метода DFAT для проведения акустических испытаний КА размещается именно в зоне «прямого поля» источников звука. Параметры динамического нагружения КА определяются практически только структурой акустического поля, формирующегося при излучении звуковых волн колонками.

По мере удаления от источника звука (в дальней зоне акустического поля) «прямое» поле ослабляется (вследствие «расхождения» звуковых волн), в то же время возрастает уровень звукового давления в поле отражённых волн. В этой зоне поля доминирует реверберационная компонента поля, которая формируется вследствие отражения звуковых волн от ограждающих поверхностей помещения. На расстоянии  $r_{\text{прям}}$  от источника звука уровни звукового давления в «прямом» поле и в поле отражённых волн одинаковы (т. е. плотность акустической энергии в «прямом» поле равна плотности энергии в поле отражённых волн), это расстояние вычисляется с помощью известного выражения:

$$r_{\text{прям}} = [(B/16\pi)]^{0,5}, \quad (1)$$

где  $B$  – акустическая постоянная испытательного помещения;  $B = A/(1 - \alpha_{\text{ср}})$ ;  $A = S_{\text{общ}}\alpha_{\text{ср}}$ ;  $\alpha_{\text{ср}}$  – среднее значение коэффициента звукопоглощения в поме-

щении;  $S_{\text{общ}}$  – общая суммарная площадь ограждающих поверхностей помещения;  $A$  – эквивалентная площадь звукопоглощения в помещении.

Следовательно, для практической реализации метода DFAT акустические условия в измерительном помещении должны быть подобраны таким образом, чтобы выполнялось соотношение:  $R \leq r_{\text{прям}}$ , где  $R$  – радиус окружности, вдоль которой размещены акустические колонки. При этом изделие (КА) располагается на оси этой окружности.

В качестве одной из модификаций метода «прямого» акустического поля в работах [7, 8] предложено использование для акустических испытаний КА метода «ближней зоны прямого акустического поля», т. е. метода (DNFAT). Причём в работах [6 – 8] авторами не выделены принципиальные (или, по крайней мере, существенные) различия между методом DFAT и методом DNFAT. Однако эти различия могут быть сформулированы на основе анализа структуры локального акустического поля в соответствии с теорией излучения звуковых волн (акустического излучения) источниками «структурного» акустического шума.

Локальное акустическое поле формируется в щелевидном пространстве между акустической колонкой и изделием (корпусом КА), его структура может быть определена на основе анализа физических процессов, которыми обусловлено излучение «структурного» акустического шума, а также теории процессов формирования акустических полей в замкнутом объёме ограниченного размера.

Как отмечалось выше, чтобы с достаточно высокой точностью имитировать реальное динамическое нагружение КА на этапе пуска РН необходимо на стендовой установке воспроизвести локальное акустическое поле, которое формируется в ограниченном пространстве (в щелевидной полости) между корпусами ГО и КА. Согласно [3, 4], испытания на воздействие звуковых волн высокой интенсивности проводятся в диапазоне частот с нижней граничной частотой 31,5 Гц. В то же время величина зазора между корпусами ГО и КА обычно варьируется в пределах 0,25 ÷ 0,5 м, поэтому на практике в области низких частот весь объём щелевидной полости может занимать ближняя зона акустического поля.

Именно метод «ближней зоны «прямого» акустического поля» (DNFAT) обеспечивает возможность наиболее корректной и точной имитации на стенде реальной пусковой динамической нагрузки аэроакустического типа, оказывающей динамическое воздействие на КА в области низких частот. Исходя из этого, целесообразно на основе

анализа основных достоинств и недостатков этого метода сформулировать методические принципы проектирования стендовых установок, основанных на применении метода DNFAT.

При проектировании стендовой установки выбор наиболее эффективных решений должен основываться на результатах моделирования локального акустического поля, формирующегося в щелевидной полости (между корпусами ГО и КА). Как известно, в непосредственной близости от вибрирующей излучающей поверхности источника «структурного» шума расположена «ближняя зона» акустического поля.

Ближняя зона подразделяется (в зависимости от частотного диапазона) на гидродинамическую ближнюю зону и геометрическую ближнюю зону. Гидродинамическая ближняя зона акустического поля формируется в диапазоне самых низких частот (в котором, вследствие эффекта «акустического короткого замыкания», вибрирующий конструктивный элемент не может излучать звуковые волны, т. е. волны сжатия/разрежения). Поэтому в гидродинамической ближней зоне формируется поле неоднородных акустических волн (пульсаций давления), эти волны называют также «псевдозвуковыми волнами», они могут возбуждаться и в несжимаемой среде.

В геометрической ближней зоне (которая формируется около поверхности ГО в области средних и высоких частот) в результате интерференции звуковых лучей (излучаемых при колебаниях поверхности источника звука) формируется неоднородное акустическое поле плоских волн с чередующимися интерференционными максимумами и минимумами.

За ближней зоной расположена дальняя зона акустического поля, в которой могут распространяться излучаемые источником звука сферические и цилиндрические расходящиеся волны.

При разработке методических принципов использования метода DNFAT для испытаний КА на стойкость к воздействию пусковой динамической нагрузки аэроакустического типа необходимо учитывать, что в этом случае на КА оказывает динамическое воздействие акустическое поле, которое характеризуется достаточно сложной структурой. Причём структура акустического поля зависит от частоты акустических колебаний. В соответствии с [2] испытания проводятся в широком диапазоне частот: от 44 до 11 360 Гц.

Поэтому для практической реализации обоих методов испытаний изделия (КА) в «прямом» акустическом поле (DFAT и DNFAT) необходимо при проектировании параметров испытательного стенда

обеспечить достаточно точную имитацию на стенде структуры и параметров локальных акустических полей, формирующихся на этапе реального пуска РН (т. е. в натуральных условиях) в отсеке ГО.

Следует, однако, отметить, что, согласно [5, 9], при проведении наземных испытаний на экспериментальных стендах практически невозможно воспроизвести с достаточно высокой точностью динамические нагрузки, действующие на КА во время реального пуска.

Согласно результатам исследований [9], проведённых на экспериментальных стендах, структура акустического поля, оказывающего динамическое воздействие на КА, существенно отличается от структуры локального акустического поля, формирующегося в отсеке ГО и оказывающего реальное воздействие на КА (во время пуска РН). Эти отличия были зафиксированы как при использовании метода диффузного акустического поля (RFAT), так и при использовании метода «прямого» акустического поля (DFAT). Кроме того, характеристики диффузного акустического поля (формирующегося в реверберационной камере) существенно отличны от характеристик «прямого» акустического поля, оказывающего динамическое воздействие на КА (при использовании метода DFAT) [9].

Поэтому принципиально невозможно обеспечить полную идентичность условий испытаний КА при использовании методов RFAT и DFAT (т. е. при использовании диффузного и «прямого» акустического поля).

Следует отметить, что в качестве основного критерия при сравнении акустических полей, оказывающих воздействие на КА на различных экспериментальных стендах и при реальном пуске РН, в работе [9] использованы характеристики вибрационного поля, которое возбуждается в корпусе КА при воздействии акустических полей.

Согласно [9], стендовая вибрационная характеристика (отклик на акустическое воздействие) удовлетворительно согласуется с характеристикой, определённой в результате измерений в натуральных условиях, при воздействии на КА (на стенде) как диффузного, так и «прямого» акустического поля. Следует, однако, учитывать, что в натуральных условиях вибрационная энергия передаётся на изделие по двум каналам, а именно вибрация возбуждается локальными акустическими полями, формирующимися в отсеке ГО в качестве отклика корпуса КА на акустическое воздействие, и кроме того, вибрация возбуждается в двигательном отсеке (при запуске РД) и передаётся на изделие (КА) по конструктивным элементам РН.

Причём, согласно [9], при проведении виброакустических измерений в натуральных условиях (на этапе реального пуска РН) объём измерений был крайне ограничен (использовалось всего несколько микрофонов и акселерометров). Поэтому степень достоверности результатов этих измерений также ограничена. Кроме того, в низкочастотной области (при  $f \leq 200$  Гц) измерения уровней звукового давления проводились в ближней зоне акустического поля, хотя, в соответствии с международными стандартами, корректные измерения уровней звукового давления могут быть проведены только в дальней зоне. Следовательно, результаты низкочастотных измерений уровней звукового давления в щелевидной полости между корпусами ГО и КА метрологически некорректны и поэтому недостоверны.

Авторами работ [3, 4] при проведении низкочастотных натуральных акустических измерений в щелевидной полости между корпусами ГО и КА допущена аналогичная методическая ошибка, а именно в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами  $31,5 \div 200$  Гц в ближней зоне акустического поля были измерены уровни звукового давления, оказывающего динамическое воздействие на микрофон измерительного прибора. Однако проведение измерений давления в ближней зоне поля не допускается в соответствии с международным стандартом [10]

В результате измерений в низкочастотной области получены, по-видимому, завышенные значения уровней звукового давления [3, 4]. Дело в том, что, в соответствии с теорией излучения звуковых волн, в низкочастотной области эффективность акустического излучения существенно снижается, вследствие уменьшения соотношения между размером источника звука и длиной волны. Однако, согласно результатам измерений, представленным в [3, 4], в низкочастотной области снижение уровней звукового давления (по сравнению с уровнями давления в области средних частот) оказалось незначительным. Следовательно, результаты измерений [3, 4] недостоверны, вероятно, вследствие использования некорректного метода измерений.

Анализ результатов экспериментальных исследований показывает [9], что моделирование виброакустических полей в ходе наземных испытаний КА (с помощью испытательных стендов) сопряжено с существенными проблемами. Для того, чтобы воспроизвести на стенде структуру реального акустического поля (т. е. локального поля, формирующегося в отсеке ГО) необходимо, прежде всего, получить достаточно точную и полную информа-

цию о характеристиках этого локального акустического поля.

При выборе метода испытаний следует также учитывать, что в натуральных условиях ширина щелевидной полости (между корпусами ГО и КА) может быть весьма ограниченной. Поэтому имитация реального акустического поля, формирующегося в щелевидном пространстве, в таких случаях возможна лишь при использовании метода DNFAT (когда изделие размещено в пределах ближней зоны акустического поля).

В то же время в 2016 г. опубликовано официальное техническое справочное руководство NASA Technical Handbook [6] по применению метода DFAT. Следует отметить, что в этом документе специфические особенности метода DNFAT (по сравнению с методом DFAT) не отражены, метод DNFAT в [6] не рассмотрен.

Исходя из этого, в данной работе рассмотрены проблемы стендового моделирования локальных акустических полей (с использованием метода DNFAT) на основе анализа реальных виброакустических процессов в отсеке ГО, которыми обусловлено формирование локальных акустических полей в щелевидной полости между корпусами ГО и КА.

**Анализ процесса формирования локального акустического поля в отсеке ГО.** Как отмечалось выше, на этапе пуска РН на корпус ГО оказывают динамическое воздействие звуковые волны высокой интенсивности, которые излучаются при истечении газовой струи из сопла РД (вследствие вихреобразования, обусловленного отрывом пограничного слоя от поверхности сопла).

Под воздействием этой пусковой динамической нагрузки аэроакустического типа возбуждаются вибрации корпуса ГО в широком диапазоне частот.

Вибрирующие корпусные конструкции ГО излучают звуковые волны (структурный шум), которые отражаются от стенок корпусов ГО и КА и возбуждают вибрации корпусной конструкции КА (и навесных элементов: антенны, солнечных батарей). При этом в объёме отсека ГО (в пространстве между корпусами ГО и КА, имеющем форму щелевидной полости) формируется локальное акустическое поле.

При моделировании процесса излучения «структурного» (вибрационного) шума цилиндрической частью корпуса ГО частотный диапазон подразделяется «критической» частотой на две частотные области с принципиально различным характером излучения структурного акустического шума: области «быстрых» и «медленных» акустических мод.

Критической частотой  $f_{cr}$  называют частоту, на которой длина изгибающей волны в конструкции рав-

на длине звуковой волны в воздухе. Критическая частота для плоской пластины вычисляется с помощью известного выражения:

$$f_{cr} = \frac{c_o^2}{2\pi h} [12\rho(1-\mu)/E]^{0,5}, \quad (2)$$

где  $h$  – толщина стенки корпуса ГО;  $c_o^2$  – скорость распространения звука в воздухе. Толщина стенки  $h$  корпуса ГО не превышает 0,01 м, поэтому, согласно (1), значение критической частоты  $f_{cr} \geq 1200$  Гц. С учётом большого диаметра корпуса ГО (обычно около 5 м) влияние кривизны корпуса на значение частоты  $f_{cr}$  можно не учитывать.

Согласно результатам измерений, на этапе пуска РН в спектре звуковых волн высокой интенсивности (излучаемых при работе РД), оказывающих динамическое воздействие на корпус ГО, преобладают составляющие на частотах ниже критической частоты  $f_{cr}$ .

Таким образом, пусковая динамическая нагрузка аэроакустического типа оказывает наиболее интенсивное воздействие на корпус ГО в докритическом диапазоне частот.

Как известно из [11], вибровозбудимость конструкции (т. е. величина отклика конструкции на динамическое воздействие) обратно пропорциональна величине механического импеданса (сопротивления) этой конструкции. Величина импеданса корпуса ГО (цилиндрической оболочки) зависит от его жёсткостных свойств, которые, в свою очередь, зависят от конструктивных особенностей ГО.

Согласно результатам измерений (на этапе пуска РН) третьоктавного спектра акустического шума в объёме отсека ГО [12], в котором были размещены различные зарубежные космические системы (Space Shuttle, Titan 34D, Delta 3000, Atlas G Centaur, Scout), в объёме отсека ГО формируется акустическое поле с широкополосным спектром (в диапазоне частот 30 – 10 000 Гц). При этом уровни звукового давления максимальны в области средних частот, а в области докритических частот уровни звукового давления снижаются по мере уменьшения частоты. Снижение («спад») уровней звукового давления в докритической области частот обусловлено: уменьшением коэффициента излучения звука корпусом ГО, уменьшением уровней вибрации корпуса ГО (вследствие увеличения его жёсткости), а также спаданием уровней звукового давления в спектре шума, излучаемого при работе РД.

В высокочастотном диапазоне (в области «быстрых мод») длина звуковой волны в воздухе

меньше длины изгибной волны в корпусной конструкции ГО, поэтому в высокочастотном диапазоне вибрирующий корпус ГО эффективно излучает звуковые волны и в дальней зоне акустического поля (зоне дифракции Фраунгофера) формируется поле цилиндрических и сферических звуковых волн.

В соответствии с упрощённой моделью излучения вибрационного шума при вычислении мощности акустического излучения, может быть использовано известное выражение (формула Кремера) [13].

В дальней зоне акустического поля сдвиг фаз между колебательной скоростью частиц воздуха и звуковым давлением равен нулю, поэтому колеблющиеся частицы воздуха перемещаются по линейной траектории (в направлении распространения звуковых волн).

В низкочастотном диапазоне (ниже частоты  $f_{cr}$ ) эффективность излучения звуковых волн существенно снижается [11, 14], поскольку для «медленных мод» длина волны в воздухе больше, чем длина изгибной волны в конструктивном элементе. Взаимодействие конструктивного элемента со средой преимущественно сводится к формированию около поверхности этого элемента ближнего акустического поля, которое, в свою очередь, подразделяется на геометрическую ближнюю зону акустического поля (зону дифракции Френеля), непосредственно примыкающую к дальней зоне, и гидродинамическую ближнюю зону.

Гидродинамическая ближняя зона акустического поля формируется вследствие периодического «перекачивания» энергии от участка среды, прилегающего к одной полуволне изгибной волны, к участку среды, прилегающему к соседней (противофазной) полуволне (и обратно).

При этом за период колебаний происходит взаимная компенсация возмущений среды (пульсаций давления), которые возбуждаются смежными участками конструкции, колеблющимися в противофазе.

Таким образом, энергия изгибных колебаний конструкции, которая передается частицам среды (прилегающим к конструкции) не излучается в виде звуковых волн (распространяющихся вдоль нормали к конструкции), а трансформируется в кинетическую энергию присоединенной массы (т. е. соколеблющегося объёма воздушной среды).

При колебаниях безграничной конструкции (например пластины) среда перетекает между соседними участками конструкции с противофазными колебаниями, причём вытесняемый при колебаниях участка конструкции объём среды (присоеди-

нённая масса) тут же полностью компенсируется объёмом среды, освобождающимся при противофазном колебании соседнего участка. При этом конструкция не излучает звуковые волны.

Это явление называют «акустическим (или гидродинамическим) коротким замыканием» (АКЗ). Оно обусловлено тем, что в области низких частот колебаний около поверхности вибрирующей безграничной конструкции воздушная среда ведёт себя как несжимаемая, поэтому в ней не может сформироваться поле звуковых волн (волн сжатия/разрежения). Как известно, колебательные процессы в несжимаемой среде описываются не с помощью уравнения Гельмгольца, а с помощью уравнения Лапласа:  $\Delta \varphi(r) = 0$ , где  $\varphi(r)$  – потенциал акустического поля.

В низкочастотном диапазоне около вибрирующей поверхности ГО сдвиг фаз  $\Delta\theta$  между колебательной скоростью частиц и колебательным давлением равен:  $\Delta\theta \approx \pi/2$ , причём в несжимаемой среде величина колебательной скорости значительно превосходит величину колебательного давления. Формирующееся при этом в гидродинамической ближней зоне акустического поля поле гидродинамических пульсаций давления называют также полем неоднородных или псевдозвуковых акустических волн. Термин «псевдозвуковые» волны используется, чтобы подчеркнуть принципиальное отличие этих «псевдозвуковых» волн (которые, естественно, не могут распространяться в несжимаемой среде) от звуковых волн, которые распространяются в сжимаемой среде (в геометрической ближней зоне и в дальней зоне акустического поля).

Неоднородные акустические волны возбуждаются около вибрирующей поверхности корпуса ГО (на этапе пуска РН) в низкочастотном диапазоне, в котором среда утрачивает упругие свойства (в режиме АКЗ). Для описания поля плоских неоднородных волн используется следующее выражение [15]:

$$P(x, z) = \exp(i\xi x - \alpha z), \quad (3)$$

где  $P(x, z)$  – звуковое давление в волне;  $\alpha = \sqrt{k^2 - \xi^2}$ ;  $x, z$  – координатные оси, соответственно, параллельная и перпендикулярная по отношению к вибрирующей корпусной поверхности ГО;  $\xi$  – постоянная распространения волны вдоль оси  $X$ ;  $k$  – волновое число.

Неоднородная волна (3) представляет собой колебательное движение воздушной среды, распространяющееся вдоль поверхности ГО (т. е. вдоль

оси  $X$ ). В направлении оси  $Z$  неоднородная волна быстро затухает (по экспоненциальному закону).

При этом частицы воздуха в волне, в соответствии с упрощённой двумерной моделью, перемещаются по эллиптическим траекториям в одной плоскости ( $X, Z$ ).

Поле неоднородных волн формируется в гидродинамической ближней зоне, причём потенциал этого поля можно представить в виде суперпозиции плоских неоднородных волн (3), распространяющихся под различными углами к оси  $X$  [15].

В объёме щелевидной полости (между корпусами ГО и КА) непосредственно около вибрирующей поверхности корпуса ГО в низкочастотной области, вследствие явления АКЗ, формируется поле неоднородных акустических волн или «псевдозвуковых» (гидродинамических) пульсаций давления, которое по своей физической природе является реактивным полем (т. е. формируется реактивная компонента акустического поля). К гидродинамической ближней зоне примыкает геометрическая ближняя зона, в которой распространяются плоские звуковые волны.

В то же время, когда на этапе пуска скорость полёта РН превышает скорость звука в воздухе, вследствие отрыва турбулентного пограничного слоя от внешней поверхности корпуса ГО, около поверхности ГО формируется поле «псевдозвуковых» пульсаций давления высокой интенсивности. Эти «псевдозвуковые» пульсации давления оказывают на корпус ГО динамическое воздействие, которым обусловлено возбуждение изгибных колебаний корпусной конструкции ГО. Энергия изгибных колебаний корпуса ГО трансформируется в энергию акустического излучения корпуса ГО, причём этот процесс практически ничем не отличается от рассмотренного выше процесса генерации акустического излучения, обусловленного воздействием на корпус ГО звуковых волн высокой интенсивности (излучаемых при истечении газовой струи из сопла РД), отражённых от пусковой площадки и пусковой установки.

При этом в объёме щелевидной полости формируется акустическое поле, которое (в зависимости от частотного диапазона) подразделяется на ближнюю зону (гидродинамическую и геометрическую) и дальнюю зону. Аналогичным образом поле «псевдозвуковых» пульсаций давления формируется около поверхности фюзеляжа самолёта (при сверхзвуковых скоростях полёта) [16].

На этапе пуска РН в турбулентном пограничном слое (на поверхности корпуса ГО) формируется по-

ле «псевдозвуковых» пульсаций давления высокой интенсивности. Эти пристеночные пульсации давления возбуждают изгибные колебания корпусной конструкции ГО, а вибрационная энергия трансформируется в акустическую энергию. Когда скорость РН превышает скорость звука, интенсивность «псевдозвуковых» пульсаций давления, обусловленных отрывом турбулентного пограничного слоя от внешней поверхности корпуса ГО, существенно превышает интенсивность пульсаций давления, которые возбуждаются при воздействии на корпус ГО звуковых волн, излучаемых при работе РД (вследствие отрыва пограничного слоя от поверхности сопла). Интенсивность «псевдозвуковых» пульсаций давления резко возрастает в зонах отрывных течений и в зонах взаимодействия пограничного слоя со скачком уплотнения [16].

Следовательно, на этапе пуска РН формированием поля пристеночных пульсаций давления (как на внешней, так и на внутренней поверхности корпуса ГО) обусловлено возбуждение изгибных колебаний корпуса ГО и последующее формирование реактивной составляющей локального акустического поля (в полости между корпусами ГО и КА).

В то же время краевые участки корпусной конструкции ГО, имеющей ограниченные размеры, излучают звуковые волны, поскольку изгибные колебания конструкции ГО на этих краевых участках не скомпенсированы противофазными колебаниями соседних участков. Однако эффективность этого звукового излучения сравнительно невелика вследствие небольших размеров участков конструкции, излучающих звуковые волны. Следовательно, при изгибных низкочастотных колебаниях корпусной конструкции ГО в гидродинамической ближней зоне акустического поля формируются как активная (в виде звуковых волн), так и реактивная (в виде неоднородных или «псевдозвуковых» волн) компоненты акустического поля.

Более подробно процессы формирования локальных акустических полей в щелевидной полости между корпусами ГО и КА рассмотрены в работе [17].

В низкочастотной области пусковое динамическое нагружение изделия (КА) обусловлено воздействием как активной, так и реактивной компонент локального акустического поля, формирующегося в щелевидном пространстве между корпусами ГО и КА. Причём, с точки зрения эффективности этого воздействия на изделие (КА), нет принципиальных различий между динамическими воздействиями, обусловленными как активной, так и реактивной компонентами локального акустического поля. Согласно результатам эксперименталь-

ных исследований [16], в непосредственной близости от вибрирующей поверхности интенсивность реактивной компоненты локального акустического поля существенно превышает интенсивность активной компоненты поля.

Обе компоненты локального акустического поля оказывают динамическое (силовое) воздействие на корпусную конструкцию и приборную панель КА. Причём при измерении уровней звукового давления в локальном акустическом поле дифференцировать активную и реактивную компоненты акустического поля практически невозможно.

Как отмечено выше, до настоящего времени не разработаны аналитические методы, которые можно было бы использовать для описания физических процессов, которыми обусловлено формирование поля пульсаций давления, неоднородных волн («псевдозвуковых» волн).

В ближней зоне формируется акустическое поле, для которого характерна весьма сложная неоднородная структура. Поэтому параметры пусковой динамической нагрузки не удастся определить с помощью чисто аналитических методов. Для приближенных расчетов разрабатываются эмпирические и полумпирические методы, основанные на использовании результатов экспериментальных исследований.

Как отмечено выше, при разработке методики наземных стендовых испытаний изделий РКТ на стойкость к воздействию динамической нагрузки аэроакустического типа, прежде всего, используются результаты натурных измерений акустических характеристик локальных акустических полей, формирующихся в щелевидном пространстве между корпусами ГО и КА.

Натурные измерения проводятся на этапе пуска РН с аналогичными мощностными характеристиками, либо на этапе лётных испытаний РН. Причём для разработки методик стендовых испытаний с использованием методов DFAT или DNFAT в результате натурных акустических измерений необходимо определить акустические характеристики как активной, так и реактивной компоненты локального акустического поля. При проведении натурных акустических измерений в щелевидном пространстве (между корпусами ГО и КА) необходимо обеспечить возможность раздельного измерения акустических характеристик активной и реактивной компонент локального акустического поля.

**Метрологические проблемы, возникающие при проведении низкочастотных акустических измерений в щелевидном пространстве между корпусами ГО и КА.** При разработке методики

наземных стендовых испытаний изделий РКТ с использованием методов DFAT или DNFAT необходимо с помощью экспериментальных методов определить характеристики локального акустического поля, формирующегося на этапе пуска РН в щелевидной полости, расположенной между корпусами ГО и КА.

Результаты таких натурных измерений используются для проектирования стендовых установок: в частности, для выбора акустических колонок, используемых в качестве «кольцевого» источника звука.

Таким образом, при проектировании стендовых установок необходимо разработать корректную методику натурных акустических измерений для определения характеристик локального акустического поля, формирующегося в щелевидной полости (между корпусами ГО и КА). Ширина полости обычно не превышает 0,5 м, поэтому измерительный преобразователь расположен на небольшом расстоянии от жёстких ограждающих поверхностей. В этом случае использование стандартных методов измерений (основанных на измерении звукового давления с помощью микрофона) сопряжено с существенными проблемами, связанными с влиянием ограждающих поверхностей на результаты измерений.

В то же время наиболее существенная метрологическая проблема при определении характеристик локальных акустических полей в низкочастотной области связана с возбуждением двух компонент акустического поля: активной и реактивной компонент. Для корректного стендового моделирования пусковой динамической нагрузки необходимо определить характеристики активной и реактивной составляющих локального акустического поля. Для решения этой проблемы целесообразно использовать метод акустической интенсивности. Для измерения величины интенсивности звука используется двухмикрофонный зонд, измерения проводятся в соответствии со стандартом [18].

В частности, чтобы определить акустическую характеристику реактивной компоненты локального акустического поля  $J_r$  с использованием метода акустической интенсивности необходимо вычислить величину градиента амплитуды давления (для двух микрофонов, используемых в зонде) с помощью известного выражения:

$$J_r = (-1 / 2\rho ck) [\partial(p_{rms})^2 / \partial r], \quad (4)$$

где  $J_r$  – реактивная компонента вектора интенсивности звука (в направлении  $r$ );  $P_{rms}$  – среднеквадратичное значение звукового давления;  $\rho$ ,  $c$  – плот-

ность и скорость звука в воздухе;  $k$  – волновое число. С помощью реактивной компоненты вектора интенсивности звука описывается структура реактивного поля неоднородных (псевдозвуковых) волн, формирующегося в гидродинамической ближней зоне локального акустического поля. Величина реактивной компоненты вектора интенсивности звука зависит от величины градиента потенциальной энергии  $V_r$  (между двумя точками в локальном поле):  $J_r = (-c^2/\omega) \text{grad}(V_r)$ , где потенциальная энергия  $V_r = P^2(t)/(2\rho_0 c_0^2)$ .

Для определения активной компоненты в локальном акустическом поле также используется известное выражение:

$$I_r = [-(p_{rms})^2 / \rho ck] \partial\phi / \partial r, \quad (5)$$

где  $\partial\phi/\partial r$  – градиент фазы  $\phi$  между двумя микрофонами в двухмикрофонном зонде. Градиент фазы определяется путём измерения разности фаз между фазовыми характеристиками двух микрофонов, используемых в двухмикрофонном интенсивностном зонде.

Для проведения интенсивностных измерений обычно используются многофункциональные многоканальные анализаторы спектра со стандартным двухмикрофонным зондом. При этом для проведения измерений используется специальное программное обеспечение, предназначенное для интенсивностных измерений. Сначала с помощью двухмикрофонного зонда измеряются амплитудно-фазовые характеристики поля в двух точках, а затем на основе расчётных формул (4), (5) могут быть определены активная и реактивная компоненты вектора интенсивности звука в локальном акустическом поле. Для определения этих компонент поля вычисляются, соответственно, фазовый градиент акустического поля и градиент амплитуды давления.

Экспериментальные исследования эффективности применения акустической интенсивности для определения характеристик комплексных (активных и реактивных) акустических полей были проведены с использованием электродвигателя специального назначения [19]. Согласно результатам низкочастотных измерений [19], проведённых в гидродинамической ближней зоне акустического поля корпуса электродвигателя (диаметр корпуса – 0,4 м), в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 80 ÷ 160 Гц уровни интенсивности реактивной компоненты акустического поля (гидродинамических псевдозвуковых пульсаций давления) превышают уровни интенсивности активной компоненты поля на 5 ÷ 9 дБ.

С помощью акустической интенсивности можно определить характеристики двух низкочастотных компонент (активной и реактивной) акустического поля, формирующегося при изгибных колебаниях цилиндрической оболочки (корпуса электродвигателя). Причём интенсивметрические измерения проводились в гидродинамической ближней зоне акустического поля – на расстоянии 0,2 м от корпуса электродвигателя [19]. Были определены низкочастотные характеристики акустического поля, формирующегося в гидродинамической ближней зоне источника структурного акустического излучения. Таким источником структурного излучения является корпусная конструкция ГО, изгибные колебания которой возбуждаются на этапе пуска РН в результате воздействия звуковых волн и пульсаций давления, возбуждающихся при отрыве пограничного слоя.

В ходе экспериментальных исследований в качестве источника структурного акустического излучения использовался цилиндрический корпус электродвигателя специального назначения, который можно рассматривать как цилиндрическую оболочку, изгибные колебания которой возбуждаются при работе электродвигателя. Интенсивметрические измерения проводились в гидродинамической ближней зоне акустического поля, которое возбуждается при изгибных колебаниях корпуса электродвигателя [19].

Таким образом, для корректного экспериментального определения характеристик локальных акустических полей, формирующихся на этапе пуска РН в целевидном пространстве между корпусами ГО и КА, следует использовать метод акустической интенсивности. Результаты интенсивметрических измерений могут быть использованы при проведении испытаний изделий РКТ (в частности КА) на стенде на основе метода DNFAT (т. е., когда изделие РКТ размещено в ближней зоне акустического поля).

Акустическая интенсивметрия является эксклюзивным методом, позволяющим определять характеристики акустического поля в гидродинамической ближней зоне этого поля. При корректном использовании интенсивметрии двухмикрофонный зонд может размещаться в ближней зоне поля в непосредственной близости от поверхности источника акустического излучения.

**Методические основы проектирования стендовых установок для испытаний изделий РКТ на основе методов DFAT и DNFAT.** При проектировании наземных стендовых установок, предназначенных для проведения испытаний изделий РКТ на стойкость к воздействию динамической нагрузки аэроакустического типа (звуковых волн высокой

интенсивности), прежде всего, необходимо обеспечить достаточно точную имитацию динамического воздействия на изделие (КА) реальной динамической нагрузки. В то же время, как отмечено в работах [5, 9], при проектировании наземных стендовых установок практически невозможно обеспечить точную имитацию динамического нагружения изделия (КА) в натуральных условиях при воздействии реальных пусковых нагрузок.

На этапе пуска РН при работе РД излучаются звуковые волны высокой интенсивности, вследствие отрыва пограничного слоя при прохождении раскалённой газовой струи через сопло РД (скорость газовой струи на выходе из сопла – около 3000 м/с, температура в струе превышает 1200 К°).

Кроме того, когда скорость полёта РН (на этапе пуска) превысит скорость звука, вследствие отрыва пограничного слоя от внешней поверхности корпуса ГО, около поверхности корпуса формируется поле интенсивных пульсаций давления. Эти пульсации давления также оказывают значительное динамическое воздействие на корпусные конструкции ГО.

При использовании для проведения наземных испытаний стендовой установки на основе применения методов DFAT или DNFAT на изделие РКТ оказывает динамическое воздействие акустическое поле, которое формируется при работе кольцевого источника акустического излучения, образованного акустическими колонками. Колонки расположены вдоль окружности, в центре которой устанавливается испытываемое изделие. Расстояние от поверхности акустических колонок до поверхности изделия (КА) при использовании метода DNFAT не превышает размер ближней зоны акустического поля, формирующегося при работе акустических колонок (акустическое излучение обусловлено работой громкоговорителей, размещённых в колонках). В то же время при проектировании стендовой установки необходимо учитывать, что ширина щелевидной полости, расположенной между корпусами ГО и КА обычно не превышает 0,5 м. Поэтому в низкочастотной области в натуральных условиях в щелевидном пространстве между корпусами ГО и КА обычно расположена гидродинамическая ближняя зона акустического поля.

Чтобы обеспечить соответствие динамического нагружения изделия в натуральных условиях (при воздействии реальной пусковой нагрузки) и на стенде необходимо, прежде всего, провести корректные измерения характеристик локального акустического поля, формирующегося на этапе пуска РН между корпусами ГО и КА. Как отмечалось выше, корректные измерения характеристик локального акустического поля можно провести

только с помощью метода акустической интенсивности. Анализ результатов экспериментальных исследований [19] показывает, что в гидродинамической ближней зоне акустического поля, формирующегося при изгибных колебаниях цилиндрической оболочки (корпуса электродвигателя), разброс уровней акустической интенсивности на измерительной поверхности незначителен. Таким образом, для гидродинамической ближней зоны характерна однородная структура акустического поля с равномерным распределением акустической энергии.

Исходя из результатов натурных измерений характеристик локального акустического поля, формирующегося на этапе пуска РН в щелевидной полости между корпусами ГО и КА, определяются параметры акустических колонок, используемых в качестве источника акустической нагрузки на наземной стендовой установке. При проектировании стендовой установки подбираются акустические колонки, мощность которых достаточна для того, чтобы имитировать на стенде динамическое нагружение изделия (КА) при воздействии на него нагрузки аэроакустического типа.

Между тем, согласно [6], при проектировании стендовых установок на основе метода DFAT рекомендуется размещать акустические колонки таким образом, чтобы расстояние от поверхности колонки до поверхности изделия составляло по крайней мере 1,5 м. При таком значительном расстоянии в пространстве между источником звука (колонок) и изделием на низких частотах, согласно [6], возбуждаются стоячие акустические волны.

В то же время, как было отмечено выше, в реальных условиях расстояние между корпусами ГО и КА (т. е. ширина щелевидной полости между корпусами) не превышает 0,5 м. Поэтому стоячие волны в этом случае классифицируются как паразитное явление, характерное именно для выбранной конструкции наземного стенда.

Влияние паразитных стоячих волн на результаты испытаний должно быть устранено с помощью специальных мероприятий, рассмотренных, в частности, в работе [6].

Кроме того, при использовании метода DFAT в геометрической ближней зоне акустического поля в области низких частот в результате интерференции звуковых лучей возбуждаются интерференционные максимумы и минимумы. Это явление следует также отнести к разряду паразитных явлений, не характерных для реальных локальных акустических полей, в которые интерференционные эффекты обычно не проявляются. В работе [6] рассмотрены мероприятия, обеспечивающие ослабление интерференционных эффектов в локальном акустическом поле.

Исходя из характеристик и структуры локальных акустических полей, формирующихся в щелевидной полости (между корпусами ГО и КА) определяются



**Экспериментальная установка [6] для испытаний изделий РКТ (на стойкость к воздействию звуковых волн высокой интенсивности) с использованием метода DFAT**

параметры стендовой установки для проведения акустических испытаний. В качестве базовой концепции, на основе которой разрабатывается схема стендовой испытательной установки, следует принять моделирование на стенде (с максимально возможной точностью) реальных локальных акустических полей, формирующихся в отсеке ГО (в щелевидной полости) на этапе пуска РН. С помощью расчётных оценок определяются частоты, на которых возбуждаются стоячие волны [6].

В состав стендовой установки входят: акустические колонки (с генератором и усилительным устройством) и рупорные громкоговорители, с помощью которых формируются широкополосные локальные акустические поля; кольцевая опора, на которой закрепляются акустические колонки; контрольная измерительная аппаратура (анализатор звука и вибрации) с микрофонами и акселерометрами; крепежная опора, на которой закрепляется испытываемое изделие (КА).

На практике в последнее десятилетие стендовые установки на основе метода DFAT использовались для проведения испытаний КА со сравнительно небольшими габаритными размерами.

В частности, в работе [6] представлена фотография типовой стендовой установки, используемой в США для практической реализации метода DFAT при проведении испытаний изделия на стойкость к воздействию акустических волн высокой интенсивности. На рисунке воспроизведена копия этой фотографии [6]. Акустические колонки образуют кольцевой источник звукового излучения высокой интенсивности, а в центре кольца располагается испытываемое изделие (КА).

В качестве альтернативного варианта можно использовать для проведения стендовых испытаний

стендовые установки на основе применения метода DNFAT. В этом случае изделие РКТ размещается в гидродинамической ближней зоне акустического поля «псевдозвуковых» гидродинамических пульсаций давления. В таких установках для воздействия на изделие РКТ акустической нагрузки также используется кольцевой источник акустического излучения, образованный акустическими колонками, установленными вдоль окружности, на оси которой устанавливается испытываемое изделие. В целом конфигурация стендовой установки на основе применения метода DNFAT близка к конфигурации установки, представленной на рисунке. Принципиальное отличие заключается в размещении изделия РКТ на гораздо меньшем расстоянии от колонок.

При использовании для проведения акустических испытаний изделий РКТ стендовых установок на основе применения метода DNFAT в низкочастотной области в щелевидном пространстве между корпусами ГО и КА формируется локальное акустическое поле «псевдозвуковых» пульсаций давления (поле неоднородных акустических волн).

Поскольку неоднородные волны практически не распространяются по направлению нормали к поверхности акустической колонки (вследствие быстрого затухания), то в низкочастотном диапазоне в щелевидном пространстве между корпусами ГО и КА не возбуждаются стоячие волны.

Таким образом, в низкочастотной области на изделии (КА) оказывает динамическое воздействие достаточно равномерное и однородное поле «псевдозвуковых» (гидродинамических) пульсаций давления.

При использовании метода DNFAT обеспечивается достаточно точное соответствие конфигурации локального акустического поля на стенде и в натуральных условиях (на этапе пуска РН). Кроме того, в низкочастотной области интенсивность «псевдозвуковых» гидродинамических пульсаций давления выше интенсивности.

При проектировании экспериментальной установки, предназначенной для практической реализации метода DNFAT, необходимо выбрать такое расположение акустических колонок, которое позволит с максимальной точностью имитировать реальное воздействие акустической нагрузки на КА. Причём колонки должны быть размещены вдоль окружности, диаметр которой равен диаметру реального ГО, в котором размещается КА.

Амплитуда колебаний мембраны электродинамического громкоговорителя, используемого в колонках, должна соответствовать амплитуде изгибных колебаний цилиндрической части корпуса ГО. Таким образом, одним из важных преимуществ метода DNFAT (по сравнению с испытаниями в диффузном поле на основе метода RFAT) является

возможность точной имитации реального динамического воздействия на КА.

Только в этом случае структура акустического поля на испытательном стенде (в полости, расположенной между корпусом КА и мембраной громкоговорителя) соответствует структуре локального акустического поля, формирующегося в пространстве между корпусами ГО и КА, на этапе пуска РН. Для каждого изделия (КА) может подбираться индивидуальное расположение колонок с учётом конструктивных особенностей конкретного КА.

Для обеспечения корректности испытаний необходимо во время испытаний осуществлять контроль за характеристиками акустического поля, формирующегося в пространстве между акустическими колонками и поверхностью изделия. С этой целью необходимо использовать интенсивметрические зонды, размещённые между поверхностью колонки и изделия. Результаты измерений должны поступать в блок управления испытаниями [6].

К основным недостаткам методов DFAT и DNFAT следует отнести ограниченную предельную мощность акустических колонок и рупорных источников звука.

**Заключение.** Анализ процесса формирования на этапе пуска РН локальных акустических полей в щелевидном пространстве между корпусами ГО и КА показывает, что основным источником акустической энергии является процесс вихреобразования, обусловленный отрывом пограничного слоя при прохождении газовой струи через сопло РД. Звуковые волны возбуждают изгибные колебания корпуса ГО и корпус излучает звуковые волны («структурный» шум).

Кроме того, процесс отрыва пограничного слоя от внешней поверхности корпуса ГО (когда скорость полёта РН на этапе пуска превышает скорость звука) сопровождается формированием поля «псевдозвуковых» пульсаций давления около поверхности ГО. Эти пульсации давления также возбуждают изгибные колебания корпуса ГО.

Звуковые волны и пульсации давления оказывают динамическое воздействие на корпус КА, на приборную платформу и на аппаратуру, размещённую на платформе.

На этапе пуска РН динамическое воздействие акустической нагрузки на аппаратуру, размещённую в КА, может привести к её повреждению. Поэтому в программу наземных испытаний КА включают испытания на стойкость к воздействию акустической нагрузки.

Испытания изделий РКТ на стойкость к воздействию акустических волн высокой интенсивности относятся к основным видам наземных стендовых испытаний. Проведение этого вида испытаний на

основе международного стандарта [2] (чаще всего в диффузном акустическом поле) сопряжено с некоторыми техническими проблемами, связанными, в частности, со значительными затратами на строительство реверберационной камеры (в которой формируется диффузное акустическое поле). Кроме того, для имитации на наземном стенде реального динамического воздействия на КА необходимо разместить КА в отсеке ГО, чтобы на КА оказывало воздействие локальное акустическое поле (формирующееся между корпусами ГО и КА), а не диффузное поле, которое может использоваться только для имитации воздействия звуковых волн на корпус ГО (на этапе пуска РН).

Для снижения затрат на проведение акустических испытаний зарубежные и российские специалисты занимаются разработкой новых альтернативных методик наземных стендовых испытаний [3, 4, 6 – 8]. В частности, одним из таких методов является метод прямого акустического поля (DFAT) и его модификация: метод «ближней зоны «прямого» акустического поля» (DNFAT) [6 – 8].

В 2016 г. опубликовано в качестве официального издания (NASA Technical Handbook) Техническое руководство NASA DFAT [6]. Документ одобрен структурными подразделениями NASA. Таким образом, новые методики, предложенные для проведения акустических испытаний изделий РКТ, официально одобрены специалистами NASA.

При использовании этих методов (DFAT и DNFAT) для имитации пускового динамического нагружения корпуса КА, обусловленного воздействием на корпус ГО звуковых волн высокой интенсивности (которые излучаются при работе РД), используются акустические колонки с электродинамическими громкоговорителями. Колонки образуют кольцевой источник звука, а испытываемое изделие (КА) устанавливается в центре этого кольцевого источника звука.

Кроме того, между изделием и акустическими колонками размещаются контрольные микрофоны. С помощью этих микрофонов обеспечивается формирование в пространстве между изделием и колонками акустического поля с характеристиками, соответствующими реальному динамическому воздействию на изделие (на этапе пуска РН).

При использовании метода DNFAT изделие (КА) устанавливается в гидродинамической ближней зоне акустических колонок (используемых в качестве источника акустического излучения).

В этом случае в области низких частот энергия гидродинамических «псевдозвуковых» пульсаций, которые возбуждаются при работе акустических колонок (в гидродинамической ближней зоне колонок), суммируется, и гидродинамические пульсации оказывают динамическое воздействие на корпус КА.

Таким образом, вместо звуковых волн на изделие (КА), расположенное в гидродинамической ближней зоне, оказывают динамическое воздействие «псевдозвуковые» пульсации давления.

Как следует из результатов экспериментальных исследований [19], в низкочастотной области в гидродинамическом ближнем поле источника звука интенсивность гидродинамических пульсаций давления (неоднородных акустических волн) существенно превышает интенсивность звукового излучения.

Поэтому при использовании метода (DNFAT) вместо метода (DFAT) интенсивность динамического воздействия нагрузки аэроакустического типа при проведении наземных стендовых испытаний изделия в низкочастотной области возрастает. В этом случае на изделие оказывают динамическое воздействие неоднородные акустические волны (гидродинамические «псевдозвуковые» пульсации), поле которых формируется в гидродинамической ближней зоне источника звука.

В качестве исходных данных при разработке конкретных методик испытаний КА на стойкость к воздействию пусковых динамических нагрузок аэроакустического типа используются результаты натуральных измерений акустических характеристик локальных акустических полей, которые формируются в щелевидном пространстве между корпусами ГО и КА на этапе пуска РН.

Поскольку в низкочастотной области в щелевидном пространстве располагается ближняя зона локального акустического поля, формирование которого обусловлено изгибными колебаниями корпусной конструкции ГО, для корректного определения акустических характеристик локального акустического поля при проведении измерений необходимо раздельно измерять характеристики активной и реактивной компонент акустического поля.

Для раздельного измерения характеристик активной и реактивной компонент локального акустического поля (в пространстве между корпусами ГО и КА) на практике может быть использован только метод акустической интенсивности. Кроме того, этот метод целесообразно использовать при определении акустических характеристик кольцевого источника звука (акустических колонок) при проведении стендовых испытаний.

При практической реализации метода DNFAT для контроля за структурой и характеристиками акустического поля, используемого в качестве акустической нагрузки при проведении стендовых испытаний, между поверхностями колонок и изделия следует размещать интенсивнострические зонды. В этом случае результаты интенсивнострических измерений, проведенных в акустическом поле, должны поступить в блок управления испытаниями [6]. На стадии проектирования наземной стендовой установки характеристики акустического поля, формирующегося в гидродинамической ближней

зоне акустической колонки могут быть определены с использованием известных методик [20].

При использовании наземных стендовых установок на основе метода DFAT дополнительные проблемы связаны с формированием в области низких частот поля стоячих волн и интерференционных максимумов в пространстве между акустическими колонками и испытываемым изделием. Возможные методы решения этих проблем рассмотрены в документах NASA [6].

При использовании метода DNFAT эти проблемы устраняются, поскольку в гидродинамической ближней зоне возбуждаются неоднородные волны (т. е. гидродинамические «псевдозвуковые» пульсации давления), которые не распространяются в направлении вдоль нормали к поверхности источника звукового излучения (т. е. акустической колонки). Поэтому стоячие волны не могут возбуждаться в пространстве между колонками и изделием.

Принципиальным отличием метода DNFAT (рассмотренного в данной работе) от метода DFAT [6 – 8] является размещение испытываемого изделия РКТ (КА) в гидродинамической ближней зоне локального акустического поля. Это локальное поле формируется на этапе пуска реального РН в пространстве между корпусами ГО и КА, а во время испытаний на наземном стенде – в пространстве между источником акустического излучения и изделием.

Локальное акустическое поле (и в натуральных условиях и на стенде) имеет комплексную структуру, поэтому необходимо раздельно определять характеристики активной и реактивной составляющих локального поля.

Для определения характеристик реактивной составляющей локального акустического поля необходимо использовать метод акустической интенсиметрии, как при проведении натуральных измерений (на этапе пуска РН в отсеке ГО), так и при контроле характеристик акустического поля при проведении испытаний изделия РКТ на наземном стенде.

Практически только с помощью интенсиметрических измерений можно определить характеристики поля «псевдозвуковых» гидродинамических пульсаций давления, формирующегося в гидродинамической ближней зоне локального акустического поля.

Для корректного определения величины пусковой динамической нагрузки на изделие РКТ необходимо определить характеристики как активной, так и реактивной компонент локального акустического поля. В области низких частот интенсивность реактивной компоненты локального акустического поля в гидродинамической ближней зоне этого поля превышает интенсивность активной компоненты поля.

### Литература

1. Либерман М. Ю. О моделировании процессов формирования пусковых нагрузок, оказывающих динамическое воздействие на космический аппарат // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2013. – Т. 136. – № 5. – С. 19 – 30.
2. ГОСТ Р 52862-2007 (IEC 60068-2-65:1993). Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие акустического шума (вибрация, акустическая составляющая). Введ. 2007-12-27. – М.: Стандартинформ, 2008. – 22 с.
3. Липницкий Ю. М., Лиходед А. И., Сидоров В. В. Сравнительный анализ спектров нагружения элементов конструкций при их вибрационном возбуждении и пульсациях акустического давления // Космонавтика и ракетостроение, 2007. – Вып. 2 (47). – С. 84 – 93.
4. Носатенко П. Я., Бобров А. В., Баранов М. Л., Шляпников А. Н. Экспериментальное определение акустических нагрузок при пусках РН «Стрела» и расчётное определение режимов экспериментальной отработки выводимых космических аппаратов // Вестник Самарского государственного Аэрокосмического университета, 2010. – № 2. – С. 112 – 122.
5. Diazl C. The Importance and Challenge of Launch Environment Testing // California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA, 2012.
6. Direct Field Acoustic Testing (DFAT), NASA-HDBK-7010, 2016.
7. Larkin P. A. Whalen M., Direct, near field acoustic testing, 1999 SAE World Aviation Congress, San Francisco, CA, 1999, Paper 1999-01-5553.
8. Larkin P. A. Direct, near field acoustic testing – Update, The Spacecraft and Launch Vehicle Environments Workshop, El Segundo, CA, USA, June 2000.
9. Hope C., Yoshinaga I., Niehues J. Simulation of Vibroacoustic Flight Environments from Launch Vehicle Perspective: Initial Review, 2014. SCLV Proceedings Spacecraft and Launch Vehicle (SCLV) Dynamic Environments Workshop, The Aerospace Corporation, El Segundo, CA, USA.
10. ГОСТ Р ИСО 3744-2013. Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии по звуковому давлению. Технический метод в существенно свободном звуковом поле над звукоотражающей плоскостью. Введ. 2014-12-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 62 с.
11. Никифоров А. С. Акустическое проектирование судовых конструкций. Справочник. – Л.: Судостроение, 1990. – 200 с.
12. Dynamic environmental criteria. – NASA Technical Handbook, NASA-HDBK-7005, 2001.
13. Cremer L., Heckl M., Ungar E. E. Structure-borne sound. Berlin: Springer-verlag, 1988.
14. Fahy F.J. Sound and structural vibration – radiation, transmission and response, London, Academic Press, 1987.
15. Исакович М. А. Общая акустика. – М.: Наука, 1973. – 496 с.
16. Авиационная акустика. Ч. 2. Шум в салоне пассажирских самолетов / Под ред. А. Г. Мунина // М.: Машиностроение, 1986. – 264 с.
17. Либерман М. Ю. Воздействие на космический аппарат пусковой динамической нагрузки, обусловленной формированием локальных акустических полей в отсеке обтекателя // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ». 2016. – Т. 151. – № 2. – С. 12 – 29.
18. ГОСТ 30457-97 (ИСО 9614-1-93). Акустика. Определение уровней звуковой мощности источников шума на основе интенсивности звука. Измерение в дискретных точках. Технический метод. Введ. 1999-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. – 22 с.
19. Разработка отраслевой методики определения акустических характеристик изделий специального назначения с использованием метода акустической интенсиметрии. Часть 1. Анализ метрологических возможностей интенсиметрической аппаратуры при определении акустических характе-

ристик изделия: ТАИК 001226.443 / А. Б. Захаренко, А. В. Шматов, Б. И. Зубренков, М. Ю. Либерман и др. // Технический отчет. – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017.

20. Keele D. B. Low-frequency loudspeaker assessment by near-field sound pressure measurement // Journal of the Audio Engineering Society, 1974. – Vol. 22. – № 4. – P. 154 – 162.

Поступила в редакцию 19.09.2017

*Михаил Юдимович Либерман, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, т. (495) 366-21-10, e-mail: mikhail\_liberman@mail.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

## APPLICATION OF DIRECT NEAR-FIELD ACOUSTIC METHOD FOR TESTING ROCKET AND SPACE PRODUCTS STABILITY TO DYNAMIC AEROACOUSTIC LOADS DURING LIFT-OFF

**M. Iu. Liberman**

*The article deals with the issues during the ground tests of rocket and space products (spacecraft in particular) for stability to lift-off acoustic loads. The emphasis is laid on the issues arising during the tests of rocket and space products for stability to diffuse acoustic field generated in the reverberation chamber. An alternative method of testing rocket and space products placed in the direct acoustic field, i.e. Direct field acoustic testing (DFAT) method, is described. In addition to that, a new method of testing rocket and space products placed in the near zone of the direct acoustic field, i.e. Direct near field acoustic testing (DNFAT) method, is considered. The main advantages of the DFAT and DNFAT methods compared to the diffuse acoustic field testing method (i.e. inside the reverberation chamber) are pointed out. The analysis of specific features of the DNFAT method used for testing rocket and space products and the main differences between the tests performed according to the DFAT and DNFAT methods are presented.*

**Key words:** near-field zone, direct acoustic field, diffuse acoustic field, lift-off acoustic load, spacecraft, payload fairing, pseudo-sound pressure oscillations, non-uniform acoustic waves.

### List of References

1. Liberman M. Iu. About simulation of formation of the lift-off loads having a dynamic impact on a spacecraft // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Proceedings. – M.: ‘VNIIEEM Corporation’ JSC, 2013. – Vol. 136. – No. 5. – pp. 19 – 30.
2. GOST R 52862-2007 (IEC 60068-2-65:1993). Mechanical environment stability test methods for machines, instruments and other industrial products. Test methods for acoustic noise (vibration, acoustic component). Introd. 2007-12-27. – M.: Standartinform, 2008. – 22 p.
3. Lipnitskii Iu.M., Likhoded A.I., Sidorov V.V. Comparative analysis of structural elements load spectra in case of their vibratory excitation and acoustic pressure oscillation // Cosmonautics and rocket engineering, 2007. – Issue 2 (47). – pp. 84 – 93.
4. Nosatenko P. Ia, Bobrov A.V., Baranov M.L. Shliapnikov A.N. Experimental determination of acoustic loads at launching of Strela launch vehicle and calculation of the modes of experimental testing of the carried spacecrafts // Vestnik of Samara State Aerospace University, 2010. – No. 2. – pp. 112 – 122.
5. Diazl C. The Importance and Challenge of Launch Environment Testing // California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA, 2012.
6. Direct Field Acoustic Testing (DFAT), NASA-HDBK-7010, 2016.
7. Larkin P. A. Whalen M., Direct, near field acoustic testing, 1999 SAE World Aviation Congress, San Francisco, CA, 1999, Paper 1999-01-5553.
8. Larkin P. A. Direct, near field acoustic testing – Update, The Spacecraft and Launch Vehicle Environments Workshop, El Segundo, CA, USA, June 2000.
9. Hope C., Yoshinaga I., Niehues J. Simulation of Vibroacoustic Flight Environments from Launch Vehicle Perspective: Initial Review, 2014. SCLV Proceedings Spacecraft and Launch Vehicle (SCLV) Dynamic Environments Workshop, The Aerospace Corporation, El Segundo, CA, USA.
10. GOST R ISO 3744-2013. Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Engineering method for an essentially free field over a reflecting plane. Introd. 2014-12-01. – M.: Standartinform, 2014. – 62 p.
11. Nikiforov A.S. Acoustic design of marine structures. Handbook. – L.: Shipbuilding, 1990. – 200 p.
12. Dynamic environmental criteria. – NASA Technical Handbook, NASA-HDBK-7005, 2001.
13. Cremer L., Heckl M., Ungar E. E. Structure-borne sound. Berlin: Springer-verlag, 1988.
14. Fahy F.J. Sound and structural vibration – radiation, transmission and response, London, Academic Press, 1987.
15. Isakovich M.A. General acoustics. – M.: Nauka, 1973 – 496 p.
16. Aviation acoustics. Part 2. Passenger aircraft cabin noise / Edited by A.G. Munina // M.: Machine building, 1986. – 264 p.
17. Liberman M.Iu. The effect of the lift-off dynamic load caused by local acoustic fields generated under the fairing on the spacecraft // Matters of Electromechanics. VNIIEEM Procedures. – M.: ‘VNIIEEM Corporation’ JC. 2016. – Vol. 151. – No. 2. – pp. 12 – 29.
18. GOST 30457-97 (ISO 9614-1-93). Acoustics. Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity. Measurement at discrete points. Engineering method. Introd. 1999-01-01. – M.: IPC Standards Publishing House, 1998. – 22 p.
19. Development of specialized procedure for determination of acoustic properties of special-purpose products using acoustic intensimetry technique. Part 1. Analysis of metrological capabilities of intensimetric instruments for determination of acoustic properties of a product: ТАИК 001226.443 / А. В. Zakharenko, А. V. Shmatkov, B.I. Zubrenkov, M.Iu. Liberman et al. // Technical Report. – M.: ‘VNIIEEM Corporation’ JC, 2017.
20. Keele D. B. Low-frequency loudspeaker assessment by near-field sound pressure measurement // Journal of the Audio Engineering Society, 1974. – Vol. 22. – No. 4. – P. 154 – 162.

*Mikhail Iudimovich Liberman, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, tel.: +7 (495) 366-21-10, e-mail: mikhail\_liberman@mail.ru. (JC «VNIIEEM Corporation»).*