

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ, СВЯЗАННЫЕ С ИЗМЕРЕНИЯМИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ, ОКАЗЫВАЮЩИХ ДИНАМИЧЕСКОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ НА ЭТАПЕ ПУСКА РАКЕТЫ-НОСИТЕЛЯ

В. Я. Геча, М. Ю. Либерман, А. В. Шматков

Для экспериментального определения акустических нагрузок на конструктивные элементы космического аппарата (на этапе пуска ракеты-носителя) измерения проводятся в узкой щелевидной полости (между корпусами головного обтекателя и космического аппарата). Метрологические проблемы, возникающие в ракетно-космической промышленности при проведении низкочастотных акустических измерений в ближней зоне акустического поля, обусловлены применением некорректной отраслевой методики. Проведение измерений уровней звукового давления в ближней зоне поля (и в непосредственной близости от корпусных конструкций головного обтекателя и космического аппарата) противоречит базовым принципам акустической метрологии. Уровни звукового давления могут быть измерены только в дальней зоне поля. Для проведения корректных акустических измерений (с учетом специфических отраслевых требований) была разработана эксклюзивная методика измерений на основе метода акустической интенсиметрии. Согласно результатам теоретического анализа и экспериментальных исследований с помощью эксклюзивной методики отраслевых измерений можно определить акустические характеристики активной и реактивной компоненты локального комплексного акустического поля, чисто реактивных полей: стоячих звуковых волн и стоячих «неоднородных» акустических волн. На основании анализа результатов экспериментальных исследований локальных акустических полей (ограниченной ближней зоной акустического поля), полученных при использовании метода акустической интенсиметрии, определена физическая природа «эффекта заполнения».

Ключевые слова: метод акустической интенсиметрии, активная и реактивная компоненты комплексного акустического поля, активная и реактивная компоненты интенсивности звука, звуковые и псевдозвуковые пульсации давления, «неоднородные» акустические волны, реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн, систематические погрешности измерений, ближняя и дальняя зоны акустического поля, «эффект заполнения».

Введение

Как известно [1 – 3], на этапе пуска космических аппаратов (КА), размещенных в отсеке головного обтекателя (ГО) ракеты-носителя (РН), в замкнутом объеме узкой щелевидной полости, расположенной между корпусами ГО и КА, формируются локальные акустические поля (ЛАП). Эти акустические поля оказывают динамическое воздействие на КА. К наиболее уязвимым элементам КА следует отнести: электронику (а именно элементы системы управления, измерительную аппаратуру), антенны, солнечные батареи. Поскольку воздействие на КА динамических нагрузок, обусловленных формированием ЛАП в отсеке ГО, может привести к повреждению элементов КА, для корректного проектирования элементов КА необходимо предварительно определить характеристики ЛАП в полости отсека ГО. В работах российских и зарубежных специалистов [4 – 6] представлены результаты экспериментальных исследований характеристик акустических полей, оказывающих динамическое воздействие на КА, размещенный в отсеке ГО. При этом в свободном пространстве отсека (между корпусами ГО и КА) для определения акустической характеристики ЛАП были измерены, исключительно, уровни звукового давления. В ходе этих

измерений микрофоны размещались непосредственно в отсеке ГО: в щелевидной полости между корпусами ГО и КА.

Результаты определения величины динамических нагрузок, обусловленных воздействием на КА ЛАП, могут быть использованы [7] при проектировании корпусных конструкций ГО и КА. В частности, при проектировании корпусных конструкций, изготовленных из новых легких композитных материалов, а также при проектировании шумозащитных элементов, с помощью которых можно повысить стойкость КА к воздействию этих динамических нагрузок.

По данным NASA [6] на этапе пуска реактивных двигателей (РД) мощность акустического излучения составляет около 0,5% от мощности двигателя РН. Однако уровень звукового давления в волне, излучаемой при истечении газовой струи из сопла РД, достигает 160 – 180 дБ. Акустические волны высокой интенсивности возбуждают вибрации корпуса ГО, которыми обусловлено излучение структурного шума и формирование акустического поля в отсеке ГО. Поэтому на этапе пуска КА динамическое воздействие, обусловленное излучением интенсивного «структурного» шума при изгибных колебаниях корпусной конструкции ГО, может

привести к повреждению элементов КА: приборов, антенн, солнечных батарей.

Согласно [2, 8], на этапе пуска РН акустические волны высокой интенсивности оказывают динамическое воздействие на корпусную конструкцию ГО в диапазоне частот от 20 до 10 000 Гц (в течение 120 с). Именно такое динамическое воздействие имитируется на испытательном стенде (в ходе наземных испытаний КА на стойкость к воздействию динамических нагрузок). Кроме того, стойкость КА к воздействию этих динамических нагрузок должна быть подтверждена в ходе летных испытаний КА. Таким образом, поскольку ЛАП оказывают динамическое воздействие на корпусную конструкцию КА, необходимо на стадии проектирования КА определить интенсивность динамического нагружения элементов КА в результате воздействия, оказываемого на них ЛАП (в широком диапазоне частот).

В настоящее время на предприятиях ракетно-космической промышленности (РКП) большое внимание уделяется повышению эффективности наземных стендовых испытаний КА, в рамках которых, в том числе, проводятся испытания изделия на стойкость к воздействию акустических волн высокой интенсивности [9]. При этом на стенде должна быть обеспечена достаточно точная имитация реального динамического нагружения изделия, обусловленного воздействием акустических волн на этапе пуска РН. Значительные инвестиции вкладываются в работы по совершенствованию испытательных стендов, которые, в частности, обеспечивают повышение точности определения величины аэроакустической динамической нагрузки, оказывающей воздействие на КА на этапе пуска РН. В работе [9] специалистами исследовательского центра NASA рассмотрены метрологические проблемы, связанные с тестированием аэроакустических нагрузок при прогнозировании уровней вибрации корпусных панелей РН (на этапе пуска РН).

ЛАП формируются в щелевидной полости вследствие излучения структурного («вибрационного») акустического шума при изгибных колебаниях (вибрации) корпусной конструкции ГО. Вибрации корпусной конструкции ГО возбуждаются на этапе пуска РН, при этом основным источником акустической энергии, которая передается на корпус ГО по конструктивным элементам РН и в виде звуковых волн, является РД. Причем, непосредственным источником акустической энергии является процесс сгорания топлива в камере сгорания РД: при сгорании топлива выделяется тепловая энергия. А затем эта тепловая энергия переносится с потоком газов, образующихся в процессе сгора-

ния топлива. Специалисты выделяют три основных канала [1 – 3], по которым энергия газового потока передается на корпусную конструкцию ГО.

В работе [2] представлена схема формирования ЛАП в объеме отсека ГО (в пространстве между корпусами ГО и КА) в результате передачи акустической (звуковой и вибрационной) энергии, которая генерируется на этапе пуска РН на корпусную конструкцию ГО. Эта схема воспроизведена на рис. 1, на котором выделены три базовых «канала» передачи акустической энергии (на этапе пуска РН) в щелевидную полость (то есть в пространство между корпусами ГО и КА).

Таким образом, на рис. 1 представлена общая схема формирования ЛАП (в свободном пространстве между корпусами ГО и КА) в результате динамического нагружения корпуса ГО, обусловленного передачей акустической (звуковой и вибрационной) энергии от РД на корпусную конструкцию ГО.

Формирование ЛАП в отсеке ГО обусловлено физическими процессами, которые непосредственно связаны с трансформацией энергии сгорания топлива (в камере сгорания) сначала в энергию высокоскоростного газового потока, а затем в акустическую энергию (энергию упругих колебаний частиц среды). Прежде всего, из камеры сгорания РД газовая струя проходит в сопло РД, это сопло можно рассматривать как канал (волновод), по которому распространяется струя. Около поверхности сопла формируется турбулентный пограничный слой, в котором возбуждаются турбулентные пульсации давления с неоднородной вихревой структурой, максимальный размер вихрей ограничен диаметром потока (сопла РД). В результате нелинейных взаимодействий между вихрями крупные вихри распадаются на вихри меньшего размера. Большие энергосодержащие вихри при распаде передают энергию вихрям меньшего размера, этот процесс

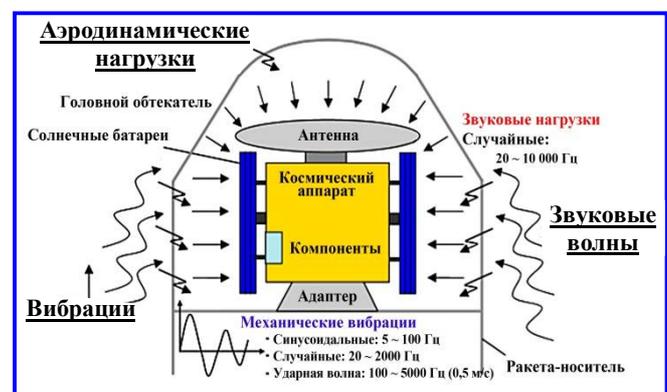


Рис. 1. Формирование акустического поля (между корпусами ГО и КА)

приводит к перераспределению энергии в спектре турбулентных пульсаций давления.

При истечении турбулентной газовой струи из сопла РД отрыв турбулентного пограничного слоя сопровождается интенсивным вихреобразованием. Вследствие процессов вихреобразования в турбулентной струе (в частности, в пограничном слое) и взаимодействия между сформировавшимися вихрями в объеме турбулентной струи формируются два поля: звуковых и псевдозвуковых (или гидродинамических) пульсаций давления. Энергия поля звуковых пульсаций давления, благодаря упругим свойствам среды, трансформируется в энергию акустического (звукового) поля: поля звуковых волн высокой интенсивности. Это поле формируется в непосредственной близости от выхлопного отверстия сопла. В частности, около среза сопла в этом акустическом поле уровни звукового давления достигают значений 160 – 180 дБ. Причем звуковые волны распространяются под углом к оси сопла.

В то же время поле пристеночных псевдозвуковых пульсаций давления формируется в той части объема пограничного слоя (формирующегося около границы струи), которая утрачивает упругие свойства вследствие воздействия на воздушную среду поля вихревых структур (формирующегося в пограничном слое при отрыве потока от поверхности сопла). Это воздействие приводит к повышению плотности («уплотнению») воздушной среды, вследствие которого среда в значительной степени утрачивает упругие свойства. В неупругой среде (расположенной в непосредственной близости от поверхности сопла) энергия поля гидродинамических пульсаций давления не может трансформироваться в энергию поля звуковых волн. Гидродинамические пульсации давления переносятся в турбулентном потоке со скоростью локальной конвекции вихрей.

Генерация шума аэродинамического происхождения (при истечении струи из сопла) обусловлена неоднородностью вихревой структуры турбулентного пограничного слоя. При истечении из сопла РД газовой струи с большим числом Рейнольдса формирование акустического поля обусловлено взаимодействием крупных вихрей (между собой).

Истечение из сопла РД свободной высокоскоростной газовой струи (скорость истечения струи превышает 3000 м/с) сопровождается генерацией интенсивного аэродинамического шума, при этом кинетическая энергия струи раскаленных газов трансформируется в акустическую энергию. Излучение шума обусловлено, в частности, таким физическим процессом, как ударное взаимодействие

раскаленной газовой струи с неподвижной окружающей средой (воздушной) и перенос энергии турбулентных пульсаций давления (в процессе распада крупномасштабных вихрей на мелкомасштабные вихри). Кроме того, взаимодействие между вихрями в турбулентной струе (в частности, в пограничном слое) также сопровождается генерацией акустического шума.

Таким образом, при истечении из сопла РД турбулентной струи раскаленных газов генерация аэродинамического шума, главным образом, обусловлена перемешиванием и ударным взаимодействием раскаленных частиц газа с неподвижными частицами холодного воздуха.

Кроме того, генерация аэродинамического шума сверхзвуковой газовой струей обусловлена взаимодействием поля пульсаций давления, формирующегося в турбулентном пограничном слое, с образующимися на выходе из сопла скачками уплотнения. Скачки уплотнения локализуются на границе струи и в области течения (по центру струи). Причем для высокоскоростных струй (при больших значениях числа Маха) в результате взаимодействия поля пульсаций давления со скачком уплотнения эффективность излучения широкополосного акустического шума существенно возрастает.

При истечении из сопла РД свободной газовой струи отрыв турбулентного пограничного слоя (от поверхности сопла) сопровождается трансформацией энергии поля турбулентных вихрей в энергию полей пристеночных пульсаций давления двух типов: звуковых и псевдозвуковых пульсаций (которым соответствуют активная и реактивная компоненты акустического поля). Возбуждение звуковых пульсаций давления обусловлено вихреобразованием в турбулентном пограничном слое (при истечении струи из сопла РД). На выходе из сопла энергия поля пристеночных звуковых пульсаций давления, сформировавшегося в турбулентном пограничном слое, трансформируется в энергию акустического (звукового) поля, причем в дальней зоне формируется акустическое поле с широкополосным сплошным спектром, в котором, в области средних частот, выделяется слабо выраженный максимум.

Звуковые волны высокой интенсивности (аэродинамический шум), излучаемые при истечении газовой струи из сопла РД, отражаются от пусковой площадки и от пусковой установки РН и, на этапе пуска РН, отраженные волны оказывают весьма существенное динамическое воздействие на корпусную конструкцию ГО. Вследствие этого динамического воздействия в корпусной конструкции ГО возбуждаются изгибные волны (вибрации).

Затем энергия изгибных волн (то есть вибрационная энергия) трансформируется в энергию комплексного акустического поля, то есть в энергию полей пристеночных пульсаций давления двух типов: звуковых и псевдозвуковых пульсаций (которым соответствуют активная и реактивная компоненты акустического поля). Энергия звуковых пульсаций давления трансформируется в энергию «структурного» (или «вибрационного») шума.

Энергия поля псевдозвуковых пристеночных пульсаций давления концентрируется около поверхности сопла и трансформируется в энергию вибрационного поля, которое возбуждается в корпусной конструкции сопла в результате динамического воздействия, оказываемого на корпус сопла псевдозвуковыми пульсациями давления.

Таким образом, на этапе пуска РН при истечении газовой струи из сопла РД в результате отрыва пограничного слоя формируется комплексное акустическое поле. Причем формирование активной и реактивной компонент этого поля обусловлено процессами, которые по своей физической природе принципиально различны. Отрыв пограничного слоя от поверхности сопла приводит к вихреобразованию в пограничном слое, в котором формируется поле вихревых структур. Энергия этого «вихревого» поля трансформируется в энергию пристеночных пульсаций давления двух типов: звуковых и псевдозвуковых пульсаций.

Формирование поля звуковых пульсаций давления обусловлено взаимодействием вихрей в турбулентном пограничном слое. Энергия этого поля трансформируется в энергию акустического поля, в дальней зоне которого звуковые волны распространяются со скоростью равной скорости звука в среде.

В то же время поле псевдозвуковых (гидродинамических) пристеночных пульсаций давления формируется в пограничном слое в непосредственной близости от поверхности сопла (то есть вблизи от границы струи). Причем формирование «вихревого» поля в турбулентном пограничном слое газовой струи приводит к весьма существенному «уплотнению» воздушной среды в той части объема пограничного слоя, которая прилегает непосредственно к поверхности сопла. В результате «уплотнения» воздушная среда в существенной степени утрачивает упругие свойства (и, потому, классифицируется как практически несжимаемая среда). При этом для описания динамических процессов в той части объема пограничного слоя, в которой среда утрачивает упругие свойства, вместо уравнения Гельмгольца используется уравнение Лапласа. В неупругой среде энергия поля псевдо-

звуковых пристеночных пульсаций давления естественно не может трансформироваться в энергию упругих звуковых волн. Формирование поля псевдозвуковых пульсаций давления обусловлено турбулентной структурой пограничного слоя. Энергия «вихревого» поля частично трансформируется в энергию чисто реактивного поля гидродинамических пульсаций давления.

Энергия поля псевдозвуковых пульсаций давления концентрируется около внутренней поверхности сопла и быстро затухает в среде при удалении от поверхности сопла. Псевдозвуковые пульсации давления переносятся в среде со скоростью локальной конвекции вихревых структур в турбулентном пограничном слое (в зоне максимальной интенсивности турбулентности). Скорость конвекции вихрей значительно меньше скорости распространения звуковых волн в среде.

В низкочастотном диапазоне под воздействием динамической нагрузки, обусловленной пристеночными гидродинамическими пульсациями давления, возбуждаются интенсивные вибрации корпусной конструкции сопла. Эта вибрационная энергия передается по конструктивным элементам РН (рис. 1) с вибрирующего корпуса сопла на корпусную конструкцию ГО. В соответствии с изложенным, энергия поля пристеночных гидродинамических пульсаций давления трансформируется в энергию вибрационного поля, которое возбуждается в корпусной конструкции сопла, и передается на корпус ГО.

Таким образом, вследствие отрыва турбулентного пограничного слоя от стенки сопла, возбуждается поле пульсаций давления, которое оказывает динамическое воздействие на стенку сопла. В результате этого воздействия возбуждаются изгибные колебания (вибрации) стенки сопла, эти вибрации передаются по конструктивным элементам РН на корпусную конструкцию ГО. Энергия изгибных колебаний корпусной конструкции ГО трансформируется в энергию акустического излучения корпуса ГО. Следовательно, на этапе пуска РН в РД энергия газовой струи трансформируется в акустическую энергию и передается от РД на корпус ГО по двум каналам: в виде звуковых волн (излучаемых при истечении газовой струи из сопла), возбуждающих изгибные колебания корпуса ГО, и в виде поля пульсаций давления, которое формируется около поверхности сопла РД.

Под воздействием динамической нагрузки, обусловленной пристеночными пульсациями давления, возбуждаются интенсивные вибрации корпусной конструкции сопла. Пульсации давления возбуждают изгибные колебания стенки сопла, а затем энергия

этих колебаний (вибраций) стенки сопла РД передается по конструктивным элементам РН на корпус ГО.

Причем в низкочастотном диапазоне наиболее интенсивные вибрации корпусных конструкций ГО возбуждаются вследствие возбуждения мод собственных колебаний корпусной конструкции на ее первых собственных (резонансных) частотах.

Кроме того, на этапе пуска при прохождении РН через плотные слои атмосферы со сверхзвуковыми скоростями полета (то есть, когда скорость полета РН превышает скорость распространения звука в воздухе), необходимо учитывать влияние на вибрации корпуса ГО еще одного источника акустической энергии. При сверхзвуковых скоростях движения (полета) РН на этапе пуска, при обтекании корпуса ГО сверхзвуковым воздушным потоком, вследствие отрыва турбулентного пограничного слоя от внешней поверхности корпуса ГО, возбуждается комплексное акустическое поле пульсаций давления двух типов: звуковых и псевдозвуковых (которым соответствуют: активная и реактивная компоненты поля). Таким образом, около внешней поверхности корпуса ГО формируется комплексное поле пульсаций давления (звуковых и псевдозвуковых). Эти пульсации давления оказывают динамическое (силовое) воздействие на корпусную конструкцию ГО. В результате динамического воздействия, оказываемого комплексным полем пульсаций давления возбуждаются вибрации (изгибные колебания) корпуса ГО, причем акустическая энергия передается от основного источника энергии (РД) на корпус ГО по третьему каналу. На этапе пуска РД скорость полета РН постепенно увеличивается до сверхзвуковых значений. На этом этапе полета РН энергия, которая генерируется при работе РД, трансформируется в энергию полета (движения) РН со скоростью, которая увеличивается вплоть до сверхзвуковых значений. Таким образом, часть энергии, которая генерируется в камере сгорания РД, фактически трансформируется в энергию комплексного поля пульсаций давления. Это поле формируется около поверхности корпуса ГО (в объеме пограничного слоя) вследствие отрыва пограничного слоя, обусловленного сверхзвуковым обтеканием корпуса ГО воздушным потоком. Энергия комплексного поля пульсаций давления передается на корпус ГО и трансформируется в энергию изгибных колебаний корпуса ГО. Этот механизм передачи энергии РД на корпус ГО квалифицируется как третий канал.

Таким образом, на этапе пуска РН, в результате обтекания корпуса ГО турбулентным воздушным потоком колебания корпусной конструкции ГО

возбуждаются вследствие динамического воздействия на стенки ГО аэродинамической нагрузки. При сверхзвуковых скоростях движения (полета) РН на этапе пуска, при обтекании корпуса ГО сверхзвуковым воздушным потоком, вследствие отрыва турбулентного пограничного слоя от внешней поверхности корпуса ГО, возбуждается комплексное акустическое поле пульсаций давления двух типов: звуковых и псевдозвуковых (которым соответствуют: активная и реактивная компоненты поля). Это поле пульсаций давления формируется около поверхности корпуса ГО и оказывает динамическое воздействие на корпусную конструкцию ГО, при этом возбуждаются вибрации (изгибные колебания) корпуса ГО. Энергия турбулентного потока, обтекающего корпус ГО, трансформируется в энергию изгибных колебаний (вибрации) корпуса ГО. Затем энергия колебаний корпуса ГО трансформируется в акустическую энергию, излучаемую корпусом ГО, то есть в энергию ЛАП, формирующегося в отсеке ГО (в щелевидной полости).

В соответствии с изложенным, на этапе пуска РН запуск РД приводит к воздействию на корпус ГО динамической нагрузки, обусловленной формированием трех акустических полей. А именно, поля звуковых волн высокой интенсивности, излучаемых газовой струей при истечении из сопла РД, а также двух комплексных полей пульсаций давления, которые формируются, соответственно: около поверхностей сопла РД и корпуса ГО. Под воздействием этой нагрузки в корпусе ГО возбуждается поле изгибных волн, а затем энергия этих изгибных волн трансформируется в энергию ЛАП, формирующихся в отсеке ГО.

Для определения характеристик локальных акустических полей, в принципе, могут быть использованы как расчетные, так и экспериментальные методы. В соответствии с вышеизложенным, применение расчетных методов для определения характеристик локальных акустических полей сопряжено с весьма значительными трудностями, которые обусловлены, прежде всего, сложной структурой локального поля. Это поле формируется в отсеке ГО в результате передачи акустической энергии по трем различным каналам. Причем до сих пор не разработаны аналитические методы для корректного описания физических процессов (а именно отрыва пограничного слоя от поверхности сопла РД и отрыва пограничного слоя при обтекании воздушным потоком поверхности ГО), которыми обусловлена генерация шума аэродинамического происхождения. Кроме того, пока не разработаны корректные расчетные модели процесса формирования поля пульсаций давления (звуковых и гидро-

динамических) вследствие вихреобразования (при отрыве пограничного слоя от обтекаемой поверхности). В то же время возможности методов чисто компьютерного моделирования этих процессов, которые не основываются на физической модели процесса, весьма ограничены.

Исследования в области аэроакустики газовых струй проводятся уже более 60 лет, однако физические механизмы генерации (излучения) аэроакустического шума турбулентным потоком и основные источники шума, которые генерируются турбулентным потоком, пока изучены недостаточно полно.

Особенно сложные проблемы возникают при исследовании физических процессов, которыми обусловлено формирование акустических полей в низкочастотной области в ближней зоне акустического поля.

Для решения задач аэроакустики применяются приближенные методы, основанные на использовании упрощенных моделей процессов генерации аэроакустического шума при распространении в среде турбулентного потока. В работах Голдстейна в качестве упрощенной аналитической модели, с помощью которой описывается механизм генерации аэроакустического шума, используются уравнения Навье – Стокса в упругой безграничной среде [10]. Метод «декомпозиции», предложенный в работах [10, 11], заключается в разложении переменных параметров потока, для описания которых используются уравнения Навье – Стокса, на две компоненты, одна из которых соответствует акустическому излучению (то есть излучению звуковых волн), а вторая компонента соответствует полю гидродинамических пульсаций давления, в котором упругие волны не могут возбуждаться. Причем эта физическая модель основывается на предположении об отсутствии обратной связи между двумя компонентами поля [11].

Метод «декомпозиции» используется для разделения турбулентного потока на две компоненты с различной физической природой. А именно на активную компоненту сжимаемой части потока, которая формируется в пограничном слое и соответствует полю звуковых пульсаций давления, и на реактивную гидродинамическую компоненту потока. Эта реактивная компонента формируется в неупругой (несжимаемой) части пограничного слоя в виде поля псевдозвуковых (гидродинамических) пульсаций давления, энергия которых, в принципе, не может трансформироваться в энергию поля упругих волн. В пограничном слое энергия активной компоненты турбулентного потока трансформируется в энергию поля звуковых пульсаций давления, а энергия реактивной компоненты турбу-

лентного потока концентрируется около обтекаемой поверхностью в виде реактивного поля псевдозвуковых пульсаций давления.

Как отмечено выше, энергия двух аэроакустических полей (которые возбуждаются соответственно при отрыве пограничного слоя от поверхности сопла РД и при отрыве пограничного слоя при сверхзвуковом обтекании внешней поверхности ГО воздушным потоком) трансформируется в вибрационную энергию, то есть в энергию изгибных волн, которые возбуждаются в корпусной конструкции ГО. Кроме того, энергия вибрационного поля, которое формируется в корпусной конструкции сопла РД (при отрыве пограничного слоя от поверхности сопла), также передается на корпус ГО.

Однако, на современном этапе развития исследований в области прикладной аэроакустики (в частности, исследований основных источников аэродинамического шума и физических механизмов, которыми обусловлена генерация шума) реальные возможности проведения корректных инженерных расчетов для ГО и КА существенно ограничены. В частности, с помощью расчетных методов невозможно определить (с достаточной степенью точности) характеристики вибрационного поля (поля изгибных волн), которое формируется в корпусе ГО на этапе пуска РН. Для проведения приближенных расчетов в аэроакустике применяются методы компьютерного моделирования с использованием упрощенных расчетных моделей аэроакустических процессов и акустических полей (в особенности, в ближней зоне поля). Существенное повышение точности таких расчетов возможно только в результате проведения экспериментальных и теоретических исследований аэроакустических процессов (в значительном объеме). В то же время анализ литературных источников показывает, что в современной инженерной практике для определения параметров пусковых динамических воздействий на КА, обусловленных формированием локальных акустических полей в отсеке ГО, преимущественно используются результаты экспериментальных исследований.

При этом измерения акустических характеристик локальных полей, формирующихся в отсеке ГО, проводятся в ходе испытаний (наземных или летных) РН-аналогов, либо при проведении рабочих пусков РН-аналогов. Как было отмечено выше, при проведении экспериментальных исследований характеристик ЛАП, в качестве измеряемой величины используется уровень звукового давления в акустическом поле [4 – 6].

Однако, следует подчеркнуть, что для проведения корректных акустических измерений в замкну-

том ограниченном объеме (в особенности, в низкочастотном диапазоне) необходимо учитывать влияние систематических погрешностей на результаты измерений. В частности, при измерении уровней звукового давления в геометрической ближней зоне акустического поля систематические погрешности обусловлены волновыми эффектами (дифракцией, интерференцией). При проведении низкочастотных акустических измерений в гидродинамической ближней зоне комплексного ЛАП систематические погрешности обусловлены влиянием реактивной компоненты поля на результаты измерений акустической характеристики активной компоненты поля. Однако учесть влияние этих систематических погрешностей измерений достаточно сложно.

Таким образом, при проведении низкочастотных измерений акустических характеристик ЛАП, формирующихся в отсеке ГО, основные метрологические проблемы обусловлены комплексной природой этих полей. Для корректного измерения характеристик комплексного поля необходимо обеспечить возможность раздельного измерения характеристик активной и реактивной компоненты поля. В то же время при измерении уровней звукового давления невозможно определить по отдельности характеристики этих двух компонент. Поэтому в диапазоне низких частот f (в особенности, когда $f \leq 100$ Гц), в соответствии с международным стандартом [12], невозможно провести корректные измерения характеристик комплексных ЛАП (так как на основании результатов измерения уровней звукового давления в комплексном акустическом поле невозможно выделить активную и реактивную компоненты поля).

В соответствии с этими стандартами, уровни звукового давления должны измеряться на измерительной поверхности, расположенной в дальней зоне акустического поля. В то же время, в низкочастотном диапазоне, вследствие большой длины звуковых волн λ_B , которая многократно превышает ширину щелевидной полости (в отсеке ГО), на практике измерения характеристик акустического поля могут проводиться, исключительно, в ближней зоне ЛАП. В частности, когда частота не превышает 100 Гц, а длина волны $\lambda_B \geq 3,4$ м, ширина полости (между корпусами ГО и КА) обычно не превышает 0,5 м.

Таким образом, в низкочастотном диапазоне расстояние от измерительной поверхности до ограждающих поверхностей отсека ГО значительно меньше длины волны λ , поэтому влияние жестких ограждающих конструкций, расположенных в непосредственной близости от измерительного микрофона, приводит к появлению дополнитель-

ных непредсказуемых систематических погрешностей измерений.

В соответствии с изложенным, для ЛАП, формирующихся в отсеке ГО, характерна весьма сложная неоднородная структура поля, обусловленная волновыми эффектами (интерференцией, дифракцией волн), комплексной структурой ЛАП (то есть влиянием реактивной компоненты этого поля на результаты измерений), а также отражениями акустических волн от ограждающих конструкций (корпусов ГО и КА). Исходя из этого, международные стандарты допускают проведение акустических измерений исключительно в дальней зоне поля, в которой формируется поле с однородной структурой, а волновые эффекты практически никак не проявляются. В то же время при проведении измерений уровней звукового давления в ближней зоне поля, в непосредственной близости от ограждающих поверхностей щелевидной полости, невозможно определить величину погрешностей и оценить точность измерений, поскольку невозможно измерить по отдельности характеристики активной и реактивной компонент поля. Поэтому низкочастотные измерения уровней звукового давления в щелевидной полости отсека ГО следует квалифицировать как метрологически некорректные измерения.

Для корректного определения интенсивности динамического нагружения корпуса КА в низкочастотном диапазоне (вследствие воздействия на него ЛАП высокой интенсивности) следует использовать альтернативную методику акустических измерений. В данной работе представлены результаты исследования метрологической эффективности метода акустической интенсивности (АИ) при проведении низкочастотных измерений в ближней зоне акустического поля (когда источник звука излучает структурный акустический шум, либо шум аэродинамического происхождения).

Целью данной работы является экспериментальное исследование метрологических возможностей метода АИ при измерении характеристик комплексных акустических полей. В этом случае интенсивность используется как эксклюзивный метод определения характеристик реактивных акустических полей, то есть как метод измерения, по отдельности, характеристик активной и реактивной компонент комплексного акустического поля. К наиболее важным областям применения этого метода в инженерной практике ракетно-космической отрасли (РКО) следует отнести измерение низкочастотных акустических характеристик комплексных ЛАП в отсеке ГО.

В соответствии с изложенным, проведение низкочастотных акустических измерений в ближней

зоне акустического поля сопряжено с достаточно сложными метрологическими проблемами. Для разработки корректной методики проведения акустических измерений в ЛАП необходимо предварительно провести исследование основных механизмов генерации низкочастотного шума при изгибных колебаниях корпуса ГО.

В РКП отраслевая методика акустических измерений в локальном поле должна основываться на результатах анализа процессов формирования комплексных ЛАП, при этом необходимо учитывать влияние структуры ЛАП на величину систематических погрешностей измерений.

1. Анализ физических процессов, которыми обусловлено формирование локальных акустических полей в щелевидной полости (между корпусами головного обтекателя и космического аппарата)

Расчетные методы определения характеристик комплексных акустических полей используются для вычисления характеристик ЛАП (формирующихся в отсеке ГО) в диапазоне высоких и средних частот. Расчетные методы основываются на моделировании физических процессов, которыми обусловлено формирование ЛАП в щелевидной полости отсека ГО (между корпусами ГО и КА).

Согласно [2, 13], в области высоких частот рекомендуется применение метода статистико-энергетического анализа (СЭА) (Statistical Energy Analysis (SEA)), а в области средних частот – применение метода конечных элементов (МКЭ) (Finite Element Method (FEM)). Как известно, метод СЭА может применяться для статистических расчетов только в диапазоне частот с достаточно высокой плотностью собственных частот изделия.

На средних частотах (когда плотность собственных частот сравнительно невелика) для проведения детерминированного расчета акустической характеристики изделия при возбуждении каждой собственной моды колебаний изделия (по отдельности) удовлетворительная точность расчетов обеспечивается при использовании метода МКЭ.

В то же время в низкочастотном диапазоне (на частотах ниже критической частоты $f_{кр}$, на которой длина упругой изгибной волны в конструкции λ_k равна длине звуковой волны в воздухе λ_B) при изгибных колебаниях конструктивных элементов корпуса ГО в результате акустического излучения формируется комплексное акустическое поле. Это комплексное поле представлено двумя компонентами: активной и реактивной.

Структура комплексного поля принципиально отлична от структуры чисто активного акустического поля (поля звуковых волн), которое формируется в области высоких и средних частот в результате звукового излучения при изгибных колебаниях корпуса ГО.

Дело в том, что в области средних и высоких частот изгибные колебания корпусной конструкции ГО возбуждают колебания частиц воздушной среды, которые непосредственно прилегают к поверхности этой конструкции. Затем энергия колебаний этих частиц среды последовательно передается соседним частицам среды, в результате энергия последовательно передается от одной частицы среды к другой (соседней) и, таким образом, распространяется в среде. Таким образом, в среде распространяется звуковая волна, при этом энергия изгибных колебаний корпуса ГО трансформируется в колебательную энергию частиц воздушной среды и распространяется в среде в виде акустической энергии (энергии звуковых волн). Однако в области низких частот акустическое излучение обусловлено принципиально иными физическими механизмами.

Согласно [14, 15], в низкочастотном диапазоне, вследствие большого периода колебаний (T_k), звуковая волна не может сформироваться при изгибных колебаниях безграничной конструкции. Дело в том, что колебания частиц воздушной среды, прилегающих к соседним областям этой вибрирующей конструкции (которые колеблются в «противофазе», то есть со сдвигом фазы между ними, равном 180°), взаимно компенсируются за время одного периода (T_k) колебаний.

При этом объем воздушной среды, вытесненный вследствие изгибных колебаний каждого участка конструкции (размер которого соответствует полуwave изгибных колебаний конструкции), полностью компенсируется объемом среды, который освобождается в результате «противофазного» колебания соседнего участка конструкции (соседней полуwave изгибных колебаний). Поэтому среда просто плавно перетекает («перекачивается») вдоль поверхности конструкции между ее соседними участками, которые колеблются в «противофазе» и, вследствие этого, противофазные колебания соседних участков конструкции (соседних полуwave) взаимно компенсируются (в течение временного промежутка, равного периоду T_k колебаний конструкции).

То есть, энергия изгибных колебаний элементов конструкции ГО трансформируется не в энергию колебаний частиц среды, а в энергию плавного перетекания частиц среды вдоль вибрирующей поверхности. При этом акустическая энергия сконцентрирована непосредственно около поверхности кон-

струкции в ближней зоне акустического поля, которую называют полем «неоднородных акустических волн». Причем энергия просто «перекачивается» от участка среды, прилегающего к одной полуволне изгибной волны (сформированной в конструкции) к участку среды, прилегающему к соседней полуволне (колеблющейся в «противофазе» по отношению к соседней полуволне), и обратно.

Таким образом, в низкочастотном диапазоне при изгибных колебаниях безграничной конструкции, вследствие взаимной компенсации колебаний соседних (смежных) участков конструкции, акустическая энергия не может излучаться конструкцией в окружающее пространство (в виде звуковых волн). Следовательно, в этом случае в комплексном акустическом поле активная компонента этого поля практически равна 0.

В соответствии с изложенным, энергия изгибных колебаний безграничной конструкции практически целиком трансформируется в энергию реактивной компоненты акустического поля. Таким образом, реактивное акустическое поле формируется вследствие преобразования энергии изгибных колебаний конструкции в энергию поля гидродинамических (или псевдозвуковых) пульсаций давления, которое возбуждается в непосредственной близости от вибрирующей поверхности конструкции.

Следовательно, энергия реактивной компоненты акустического поля сконцентрирована вблизи от поверхности вибрирующей конструкции в виде кинетической энергии присоединенной массы объема среды, прилегающего к конструкции. Эта реактивная компонента поля может быть представлена либо в виде поля псевдозвуковых (гидродинамических) пульсаций давления, либо в виде поля «неоднородных» акустических волн.

Для описания «неоднородной» акустической волны используется решение уравнения Гельмгольца (для плоскости с координатными осями X, Z), в котором вещественный волновой вектор \vec{k} (в отличие от решения волнового уравнения для однородной плоской волны) заменен на комплексный волновой вектор: $\vec{\xi} + i\vec{\alpha}$. Причем для постоянной распространения волны (ξ) выполняются соотношения: $\alpha = \sqrt{\xi^2 - k^2}$, а ξ всегда больше k . Для формального описания «неоднородной» акустической волны используется решение уравнения Гельмгольца в следующем виде: $P = \exp[i\xi X - \alpha Z]$, где P – звуковое давление в волне; X, Z – оси координат. Таким образом, «неоднородную» акустическую волну можно представить как волну с комплекс-

ным волновым вектором. «Неоднородная» акустическая волна распространяется вдоль поверхности вибрирующей конструкции с фазовой скоростью (c_ϕ), причем скорость распространения волны меньше скорости (c) распространения звука в среде. Скорость распространения «неоднородной» акустической волны вычисляется с помощью выражения: $\gamma = \omega/\xi$, где ω – частота колебаний. Энергия «неоднородных» акустических волн сконцентрирована около поверхности вибрирующей конструкции, поскольку в неоднородной волне амплитуда колебаний убывает по экспоненциальному закону по мере удаления от конструкции.

«Неоднородная» акустическая волна (в отличие от однородной) может существовать в несжимаемой среде, в которой волновое число $k = 0$, а уравнение Гельмгольца превращается в уравнение Лапласа: $\Delta P = 0$. Среду можно считать несжимаемой, если k^2 значительно меньше ξ^2 , для описания «неоднородной» волны в несжимаемой среде используется следующее выражение: $P = \exp[i\xi X - \xi Z]$.

Более подробно свойства «неоднородных» акустических волн рассмотрены в монографии [21].

Таким образом, в идеализированном случае: а именно, при изгибных колебаниях безграничного элемента конструкции (например, пластины) в низкочастотном диапазоне (ниже критической частоты), вся энергия изгибных колебаний трансформируется в энергию реактивной компоненты поля, а активная компонента равна 0. Это физическое явление называют «акустическим (или гидродинамическим) коротким замыканием» (АКЗ). Энергия реактивной компоненты поля представлена в виде энергии поля псевдозвуковых (или гидродинамических) пульсаций давления, эта энергия сконцентрирована около вибрирующей поверхности конструкции и быстро затухает по мере ее удаления от поверхности конструкции.

В гидродинамической ближней зоне акустического поля (около поверхности конструкции) формируется чисто реактивное поле псевдозвуковых пульсаций давления, среда утрачивает свои упругие свойства и ведет себя как несжимаемая.

В несжимаемой среде не могут распространяться звуковые волны. Поэтому для описания гидродинамических пульсаций давления в несжимаемой среде используется уравнение Лапласа (вместо уравнения Гельмгольца, с помощью которого описывается процесс распространения звуковых волн в упругой среде).

Следует отметить, что в результате эффекта АКЗ полная компенсация акустического излучения может быть обеспечена только при колебаниях безграничной однородной пластины (то есть в иде-

ализированном случае). В то же время, поскольку все реальные конструкции имеют ограниченные размеры, в них активная компонента поля никогда не равна 0. Краевые области конструкции излучают звуковые волны, так как акустическое излучение этих краевых (граничных) участков конструкции не компенсируется противофазным излучением соседних участков. Поэтому вследствие изгибных колебаний корпусной конструкции ГО, краевые участки (области) конструкции (а также области неоднородного поля изгибных волн) излучают звуковые волны. В этом случае колебания краевых участков конструкции не компенсируются «противофазными» колебаниями соседних участков (рядом с краевыми участками корпусной конструкции ГО соседних участков просто нет), поэтому при изгибных колебаниях краевых участков конструкции излучаются звуковые волны (активная компонента комплексного поля).

Это акустическое излучение не компенсируется противофазными колебаниями соседних участков конструкции. Поэтому в низкочастотном диапазоне вследствие изгибных колебаний реальной конструкции (в частности корпуса ГО, размеры которого ограничены) около поверхности конструкции всегда формируется комплексное акустическое поле. Таким образом, акустическая энергия распределена между активной и реактивной компонентами комплексного поля. В то же время следует отметить, что в ближней зоне акустического поля только небольшая часть энергии излучается в виде звуковых волн, а наибольшая (практически основная) часть энергии представлена в виде энергии реактивного поля (поля псевдозвуковых пульсаций давления).

В соответствии с изложенным, при изгибных колебаниях конструктивных элементов корпуса ГО, энергия этих колебаний частично трансформируется в кинетическую энергию реактивной компоненты комплексного акустического поля (а именно ближней зоны этого поля). Следует подчеркнуть, что в ближней зоне комплексного акустического поля интенсивность реактивной компоненты поля значительно превышает интенсивность активной компоненты поля. Однако, по мере удаления от вибрирующей конструкции ГО, интенсивность реактивной компоненты поля быстро уменьшается (по экспоненциальному закону), поэтому на значительных расстояниях от конструкции интенсивность активной компоненты поля существенно больше, чем интенсивность реактивной компоненты.

Таким образом, в низкочастотном диапазоне при формировании в отсеке ГО ЛАП в ближней зоне поля доминирует реактивное поле, которое

формируется вследствие трансформации энергии изгибных колебаний корпусной конструкции ГО в энергию поля псевдозвуковых пульсаций давления. При этом весь объем щелевидной полости (между корпусами ГО и КА) занимает ближняя зона акустического поля, поскольку на низких частотах (ниже 100 Гц) ширина полости значительно меньше длины звуковой волны λ_B .

Таким образом, ближняя зона поля подразделяется на две локальные составляющие ближней зоны с различной физической природой поля: на гидродинамическую ближнюю зону и геометрическую ближнюю зону. В гидродинамической ближней зоне, расположенной рядом с корпусной конструкцией ГО, среда утрачивает упругие свойства и ведет себя как несжимаемая.

Поэтому в гидродинамической ближней зоне не могут возбуждаться и распространяться звуковые волны, в этой зоне формируется поле гидродинамических (или псевдозвуковых) пульсаций давления. Поле псевдозвуковых пульсаций давления квалифицируется как чисто реактивное поле. В отличие от звуковых волн, которые распространяются в воздухе со скоростью звука (340 м/с), псевдозвуковые пульсации давления распространяются («перекачиваются») между противофазными участками среды (то есть смежными участками конструкции) со значительно меньшей скоростью.

Таким образом, в ближней зоне для структуры акустического поля характерна значительная степень неоднородности. Дело в том, что в «геометрической» ближней зоне структура поля определяется фазовыми характеристиками акустического поля, поэтому в «геометрической» ближней зоне, весьма существенное влияние на структуру поля оказывают волновые эффекты (интерференция, дифракция звуковых лучей).

В то же время, в дальней зоне акустическое поле имеет однородную структуру в виде сферической волны, излучаемой точечным источником звука. Поэтому, в соответствии с действующим стандартом [12], измерения характеристик акустических полей машин (частотного спектра уровней звукового давления) проводятся исключительно в дальней зоне акустического поля. В качестве «границы», которая разделяет между собой ближнюю и дальнюю зоны акустического поля, используется последний интерференционный максимум, который формируется в ближней зоне поля.

Однако на практике при проведении низкочастотных измерений в полости ограниченного размера (в частности, в отсеке ГО между корпусами ГО и КА) невозможно проводить акустические из-

мерения в дальней зоне поля, поскольку размер полости меньше размеров ближней зоны. Поэтому в инженерной практике приходится проводить акустические измерения в таких весьма неблагоприятных условиях. В то же время в соответствии с базовыми принципами акустической метрологии, при разработке корректной методики таких измерений необходимо в обязательном порядке обеспечить возможность проведения измерений с контролируемой погрешностью.

В частности, необходимо учитывать, что при проведении низкочастотных измерений в ближней зоне акустического поля звуковые волны и псевдозвуковые (гидродинамические) пульсации давления оказывают практически одинаковое динамическое воздействие на измерительный микрофон [16]. Поэтому микрофон не может обнаружить какие-либо различия между активной и реактивной компонентой поля.

Несмотря на принципиально различную физическую природу активного и реактивного поля, в низкочастотном диапазоне (когда $f \leq 100$ Гц), то есть в квазистатическом режиме, в гидродинамической ближней зоне поля пульсации давления (как звуковые, так и псевдозвуковые) оказывают практически одинаковое динамическое воздействие на мембрану микрофона.

Следовательно, при проведении измерений уровней звукового давления в ЛАП (то есть в щелевидной полости отсека ГО), которое формируется в гидродинамической ближней зоне, будет измерен суммарный уровень звукового давления в комплексном акустическом поле. Поскольку реальное воздействие на КА оказывает активная компонента поля, то реактивную компоненту поля следует квалифицировать как источник систематической погрешности. В результате таких измерений будет получено завышенное значение уровня звукового давления (по сравнению с чисто активной компонентой поля, которая возбуждается вследствие трансформации энергии поля звуковых пульсаций давления в энергию поля звуковых волн).

Величина систематической погрешности таких измерений определяется уровнем звукового давления в чисто реактивном поле псевдозвуковых пульсаций давления, которое очень быстро затухает (по экспоненциальному закону) по мере удаления от корпуса ГО.

К принципиальным отличиям реактивного поля от активного поля, прежде всего, следует отнести отсутствие волнового движения, поскольку, в отличие от активных полей, в реактивном поле акустическая энергия не переносится волной, которая распространяется в среде. В низкочастотном диапазоне при проведении измерений уровня давления в реактивном

поле (с помощью микрофона) можно определить только параметры этого поля (поля гидродинамических пульсаций давления) непосредственно в точке измерения. Причем на низких частотах (f ниже 100 Гц) эти гидродинамические пульсации давления оказывают такое же динамическое воздействие на мембрану микрофона, как и звуковые пульсации давления (в активном акустическом поле). Таким образом, в низкочастотном диапазоне при измерении уровней звукового давления в комплексном акустическом поле невозможно разделить измерить характеристики активной и реактивной компонент поля. В результате таких измерений будут определены суммарные уровни давления (в активном и реактивном акустических полях). Поэтому при измерении уровней звукового давления в комплексном акустическом поле выделить параметры реального динамического воздействия, оказываемого на КА в чисто активном поле, практически невозможно.

В геометрической ближней зоне, расположенной непосредственно за гидродинамической ближней зоной, распространяется плоская звуковая волна, причем структура поля представлена в виде интерференционной картины, формирующейся в результате интерференции звуковых лучей, излучаемых при изгибных колебаниях корпусной конструкции ГО.

Как известно [14 – 16], размер гидродинамической ближней зоны r_H значительно меньше, чем $(\lambda_B/2\pi)$, размер геометрической ближней зоны r_G превышает $(L/2\pi)$, а расстояние от источника звука до границы дальней зоны определяется из соотношения: $r_D \geq 3\lambda_B/(2\pi)$, где L – размер источника звука; λ_B – длина звуковой волны.

Таким образом, на практике в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц) весь объем щелевидной полости (между корпусами ГО и КА) занимает ближняя зона акустического поля. В гидродинамической ближней зоне активная компонента акустического излучения близка к 0, поскольку благодаря эффекту АКЗ излучение соседних участков пластины, колеблющихся в противофазе, взаимно компенсируется (за исключением краевых участков конструкции, излучение которых не компенсируется излучением соседних участков).

В низкочастотном диапазоне расстояние между этими соседними участками, колеблющимися в противофазе, меньше длины звуковой волны в воздухе. Поэтому энергия изгибных колебаний корпусной конструкции ГО трансформируется не в энергию акустического излучения конструкции, а в энергию реактивного поля гидродинамических пульсаций давления (или поля «неоднородных» акустических волн). Причем энергия этого реактивного поля (поля псевдозвуковых пульсаций давления) сконцен-

трирована около поверхности корпуса ГО в виде кинетической энергии присоединенной массы объема среды, примыкающего к конструкции. А энергия активной компоненты поля (поля звуковых пульсаций давления) излучается краевыми («нескомпенсированными») участками корпусной конструкции ГО.

Для определения расчетных характеристик комплексного акустического поля, формирующегося в щелевидной полости, необходимо вычислить характеристики активной и реактивной компонент акустического поля. Как отмечено выше, активная и реактивная компоненты комплексного поля формируются в результате возбуждения около поверхности корпусной конструкции ГО двух полей пульсаций давления: соответственно, поля звуковых и поля псевдозвуковых пульсаций давления. Возбуждение этих полей пульсаций давления обусловлено изгибными колебаниями корпусной конструкции ГО.

Анализ физических процессов, которыми обусловлено формирование ЛАП в щелевидной полости (между корпусами ГО и КА) показывает, что в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц) определение характеристик этих полей с использованием чисто расчетных методов не представляется возможным. В частности, пока не разработаны корректные расчетные модели весьма сложных процессов отрыва пограничного слоя при обтекании поверхности сопла РД высокоскоростным потоком газов, либо при обтекании внешней поверхности ГО воздушным потоком. Не разработана корректная методика приближенного расчета акустического поля в ближней зоне с использованием аналитических методов.

В соответствии с изложенным, для определения характеристик ЛАП, которое формируется в отсеке ГО, используются экспериментальные методы. При разработке методики экспериментального определения характеристик локального акустического поля необходимо учитывать влияние систематических погрешностей на результаты измерений. При проведении низкочастотных акустических измерений в комплексном акустическом поле систематические погрешности обусловлены, прежде всего, влиянием на результаты измерений реактивной компоненты этого комплексного поля, а также влиянием замкнутого ограниченного объема на характеристики ЛАП, которое сформировалось в этом замкнутом объеме.

Кроме того, в низкочастотном диапазоне необходимо решать традиционные метрологические проблемы, связанные с измерением характеристик поля, которое формируется в результате возбуждения очень длинных (по сравнению с характерными размерами полости в отсеке ГО) акустических волн.

2. Метрологические проблемы, возникающие в ракетно-космической промышленности в связи с проведением измерений акустических характеристик локальных акустических полей в низкочастотном диапазоне

Для экспериментального определения характеристик акустических полей машин и механизмов используются традиционные методики, представленные в международных стандартах. А именно, речь идет о русифицированной версии [12]. В соответствии с этим профессиональным стандартом, измерения проводятся в специальных акустических заглушенных камерах с габаритными размерами, существенно превышающими длину звуковых волн во всем рабочем диапазоне частот. В таких камерах обеспечивается возможность проведения акустических измерений в практически идеальных условиях. В акустической камере формируется чисто свободное, либо «существенно свободное» акустическое поле, поэтому влияние помещения на результаты измерений незначительно (с жестко контролируемой погрешностью измерений), причем измерения проводятся в дальней зоне, для которой характерна однородная структура акустического поля.

В то же время в ходе разработки ракетно-космической техники (РКТ) при проведении акустических измерений, связанных с решением инженерных проблем, характерных для РКО (в частности, связанных с формированием ЛАП в отсеке ГО), возникают принципиально иные специфические метрологические проблемы. Во-первых, спроектировать акустическую камеру для корректных измерений (в широком диапазоне частот с нижней граничной частотой 22 Гц) акустических характеристик крупногабаритных объектов (таких как РН или, даже, только ГО) достаточно сложно. Кроме того, при работе РД через сопло проходит струя (поток) раскаленных газов, поэтому при проведении измерений (в ходе летных испытаний) преобразователи (датчики) должны быть защищены от воздействия высоких температур.

На практике в РКО акустические измерения проводятся в достаточно ограниченном объеме. В частности, в инженерной практике предусмотрено (в соответствии с международным стандартом) проведение испытаний КА на стойкость к воздействию звуковых волн высокой интенсивности. В соответствии со стандартом (ГОСТ Р 52862-2007 (МЭК 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). М.: Стандартинформ, 2008. 21 [1] с.) испытания (и соответствующие измерения) проводятся в диапазоне

частот от 22,4 до 11 200 Гц (третьоктавные полосы частот со среднегеометрическими частотами от 31,5 Гц до 10 кГц). При этом наиболее сложные метрологические проблемы связаны с низкочастотными измерениями, в особенности на частотах ниже 100 Гц. В этом частотном диапазоне ширина щелевидной полости отсека ГО (в которой формируется ЛАП) значительно меньше длины волны (на частоте 22 Гц значение $\lambda_{\text{з}} \approx 15$ м), поэтому размер полости меньше размера ближней зоны акустического поля.

В то же время, как было отмечено в разделе 1, в отсеке ГО на этапе пуска формируется комплексное ЛАП. При этом было показано, что для измерения характеристик комплексных акустических полей не могут быть использованы методы измерений, которые, в соответствии с действующими стандартами, основаны на измерении уровней звукового давления. С помощью таких методов невозможно измерить, по отдельности, характеристики активной и реактивной компонент комплексного поля.

Таким образом, при разработке методики низкочастотных акустических измерений в РКО принципиальные метрологические проблемы обусловлены, прежде всего, тем, что измерительный микрофон приходится размещать в ближней зоне комплексного ЛАП, формирующегося в щелевидной полости (между корпусами ГО и КА). Причем корректное определение характеристик комплексного поля (то есть раздельное определе-

ние характеристик активной и реактивной компонент) возможно только на основе специальной методики измерений (принципиально отличной от методик, основанных на измерении уровней звукового давления в акустическом поле). Следует также отметить, что вследствие ограниченной ширины полости невозможно установить микрофон на значительном расстоянии (превышающем длину волны звука) от ограждающих поверхностей полости. Поэтому на практике, согласно [4 – 6], микрофон размещают в непосредственной близости от жестких ограждающих конструкций отсека ГО и от корпуса КА. В частности, в работе [6] представлены результаты экспериментальных исследований акустического поля, формирующегося в отсеке ГО носителя Titan IV в свободном пространстве между корпусом ГО и корпусом КА Cassini, спроектированного в США для полета на планету Сатурн (в 2004 г.). В работе [6] представлена схема размещения КА Cassini в отсеке ГО и схема размещения измерительных микрофонов в свободном пространстве между корпусами ГО и КА (рис. 2, а).

Согласно [6], при измерении акустических характеристик ЛАП, формирующегося в щелевидной полости (между корпусами ГО и КА), микрофоны были сконцентрированы главным образом в зонах 9 и 10 (рис. 2, а), причем измерения были проведены в диапазоне частот от 20 до 10 000 Гц. Измерения проводились в ходе как наземных, так и летных испытаний КА.

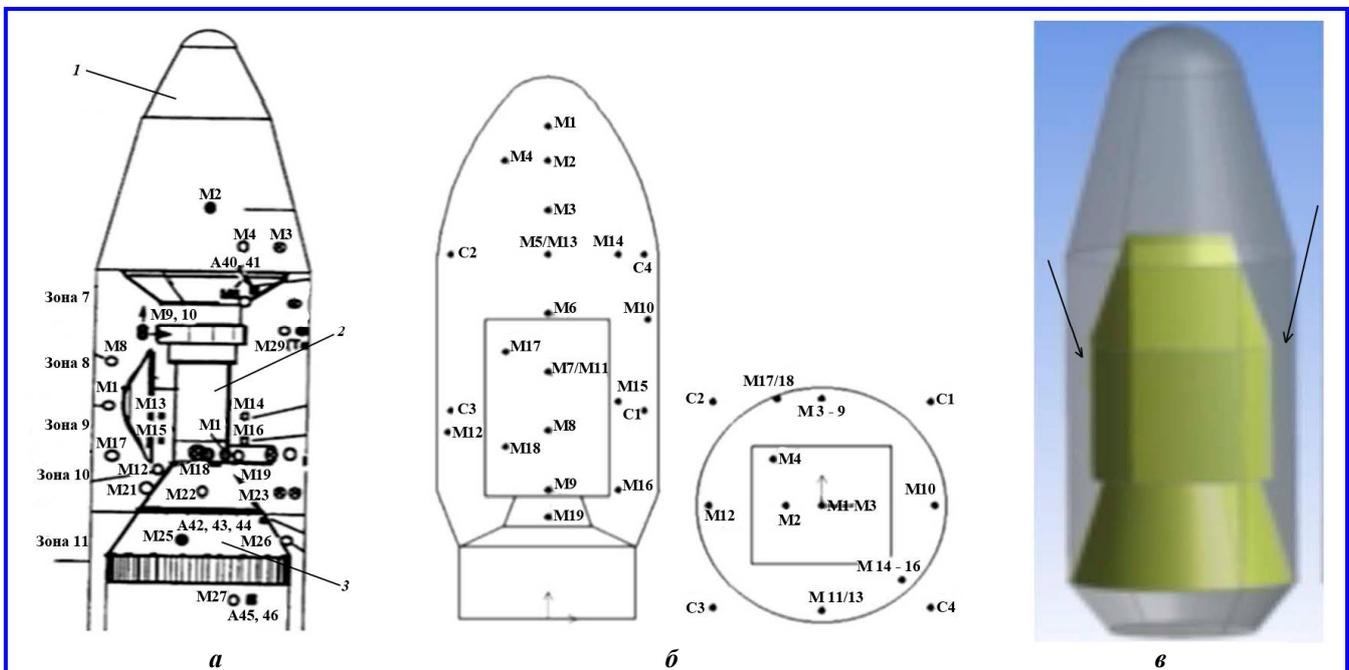


Рис. 2. Схема размещения микрофонов при измерении характеристик ЛАП, формирующегося в щелевидной полости: а – между корпусами ГО PH Titan IV и КА Cassini, где 1 – отсек ГО ракеты Titan IV; 2 – КА Cassini; 3 – переходное устройство для крепления КА Cassini; M1, M2, M3, ... – микрофоны; б – между корпусами ракетных образцов ГО и КА в рамках программы исследования влияния эффекта на характеристику ЛАП; в – между корпусами ГО и КА (РН «Союз») (указано стрелками)

Как следует из рис. 2, а, микрофоны были размещены в щелевидной полости, в непосредственной близости от жестких ограждающих конструкций (корпусов ГО и КА).

Причем в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц) весь объем этой полости занимает ближняя зона акустического поля, формирующегося в результате излучения структурного звука корпусом ГО (в котором возбуждается поле изгибных волн). В то же время, в соответствии с действующими стандартами, при измерении уровней звукового давления микрофон следует размещать исключительно в дальней зоне акустического поля.

На рис. 2, б [17] представлена схема размещения измерительных микрофонов в щелевидной полости (между корпусами макетных образцов ГО и КА) при проведении исследований влияния «эффекта заполнения» на характеристику ЛАП. Микрофоны были размещены (рис. 2, б) в щелевидной полости (между макетными образцами корпусов ГО и КА) и в верхней части макета отсека ГО (над макетом корпуса КА). На рис. 3, в представлено схематичное изображение узкой щелевидной полости (между корпусами ГО и КА) в РН «Союз» [18].

Следует отметить, что в работах [6, 17] не представлено никакой информации о существовании в РКО аттестованной отраслевой методики акустических измерений, обеспечивающей возможность корректного определения характеристик ЛАП, которые формируются в отсеке ГО ракеты-носителя Titan IV. Не представлена также информация о погрешностях измерений, о точности измерений. Поэтому результаты измерений, представленные в [6], с метрологической точки зрения следует квалифицировать как некорректные результаты. На практике оценить точность этих измерений и величину систематических погрешностей измерений невозможно, поскольку в [6] не представлена информация о физической природе поля (а именно об определении характеристик активной и реактивной составляющей поля).

Аналогичный подход к проведению измерений характеристик акустических полей, формирующихся на этапе пуска в отсеках РН, был реализован авторами работ [4, 5]. Таким образом, в РКО до сих пор не разработана корректная отраслевая методика для измерения характеристик акустических полей, формирующихся в отсеках РН (в частности, в отсеке ГО). Использование стандарта [12] для измерения уровней звукового давления в щелевидной полости (между корпусами ГО и КА) некорректно, поскольку в этом случае условия, при которых проводятся измерения,

не соответствуют требованиям этого метрологического стандарта.

Причем при измерении уровней звукового давления невозможно измерить по отдельности характеристики активной и реактивной компонент комплексного акустического поля.

В рамках программы разработки методических принципов, на которых должны основываться инженерные методики определения характеристик локальных акустических полей, формирующихся в отсеке ГО, были проведены теоретические и экспериментальные исследования различных методов измерений акустических характеристик ЛАП. Исходя из результатов анализа публикаций (в научно-технических изданиях), в которых была рассмотрена метрологическая эффективность различных методов измерений (а также опыт применения этих методов в инженерной практике применительно к отраслевым проблемам РКО), в рамках данной работы были проведены экспериментальные исследования метрологических возможностей метода АИ.

К принципиальным преимуществам этого метода, прежде всего, следует отнести возможность проведения низкочастотных интенсивметрических измерений в ближней зоне ЛАП. В то же время, при проведении низкочастотных измерений характеристик ЛАП с использованием стандартной методики [12] (в соответствии с которой измеряются уровни звукового давления в акустическом поле), запрещено устанавливать микрофоны на измерительных поверхностях, расположенных в ближней зоне акустического поля.

3. Методические принципы определения низкочастотных интенсивметрических характеристик комплексных акустических полей

В отличие от звукового давления интенсивность звука является энергетической характеристикой акустического поля. Причем интенсивность звука в комплексном акустическом поле подразделяется на две компоненты: активную и реактивную компоненту интенсивности звука. При проведении интенсивметрических измерений (с помощью двухмикрофонного зонда) результаты измерения уровней звукового давления в двух точках акустического поля используются для вычисления уровней как активной, так и реактивной компонент интенсивности звука в комплексном акустическом поле.

Для раздельного вычисления активной и реактивной компонент интенсивности звука используется [19, 20] метод PAGE [The Phase and Amplitude Gradient Estimation].

Этот метод основывается на определении градиентов фазы и давления в комплексном акустиче-

ском поле (на основании результатов интенсивметрических измерений, проведенных с помощью двух-микрофонного зонда). Значения этих градиентов (амплитуды и фазы) используются для вычисления амплитуд активной и реактивной компонент интенсивности звука.

Причем амплитуда активной компоненты интенсивности звука пропорциональна градиенту фазы $[\nabla\varphi]$, а амплитуда реактивной компоненты интенсивности звука пропорциональна градиенту давления $[\nabla P]$ (в комплексном акустическом поле). Для вычисления значений активной $\vec{I}_{act}(\omega)$ и реактивной $\vec{J}_{react}(\omega)$ компонент интенсивности звука используются известные выражения [19, 20]:

$$\vec{I}_{act}(\omega) = P^2 \nabla \varphi / (2\rho_0 \omega); \quad (1)$$

$$\vec{J}_{react}(\omega) = -P \nabla P / (2\rho_0 \omega), \quad (2)$$

где P , ∇P – соответственно амплитуда и градиент давления в акустическом поле; $\nabla \varphi$ – градиент фазы; ω – частота колебаний; ρ_0 – плотность воздуха.

Таким образом, с помощью интенсивметрических измерений (метода АИ) можно определить все характеристики комплексного акустического поля (с разделением активной и реактивной компонент поля) в ближней зоне этого поля, которое формируется в щелевидной полости отсека ГО.

Согласно [16], в ближней зоне акустического поля при измерении уровней звукового давления в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц) микрофон не может различить активную и реактивную компоненты поля (и измерить их по отдельности). Поэтому с помощью микрофона может быть измерен только суммарный уровень звукового давления в двух акустических полях (которые формируются в ближней зоне источника звука): в поле звуковых пульсаций давления и в поле псевдозвуковых пульсаций давления. Энергия звуковых пульсаций давления трансформируется в энергию активного поля звуковых волн (распространяющихся в дальней зоне поля), а энергия псевдозвуковых пульсаций давления трансформируется в энергию реактивного поля неоднородных акустических волн [21].

В то же время при использовании метода АИ можно с помощью вычислений по формулам (1) и (2) разделить эти две компоненты поля (активную и реактивную компоненты) с учетом различий в физическом механизме генерации двух типов пульсаций давления (звуковых и псевдозвуковых пульсаций). В результате интенсивметрических измерений вычисляются значения градиентов давления $[\nabla P]$ и фазы $[\nabla \varphi]$, которые входят в расчетные формулы (1) и (2).

Как отмечено выше, при изгибных колебаниях корпусной конструкции ГО эффективность акустического излучения зависит от частоты колебаний. Характер акустического излучения принципиально различен для двух диапазонов частот, разделенных критической частотой ($f_{кр}$). В диапазоне частот ниже критической за период колебаний частицы среды плавно перетекают между «противофазными» участками конструкции, не претерпевая сжатия. При этом сопротивление акустического излучения $Z_{изл}$ (на единицу поверхности изгибно-колеблющейся конструкции) становится мнимой величиной ($Z_{изл} = j\omega m_c$), зависящей от массы (m_c) соколеблющейся воздушной среды. В этом случае, вблизи от поверхности конструктивного элемента ГО формируется ближняя зона комплексного акустического поля (поле неоднородных акустических волн, которые быстро затухают при удалении от колеблющейся поверхности ГО).

В диапазоне средних и высоких частот ($f \geq f_{кр}$) при изгибных колебаниях ГО коэффициент акустического излучения близок к 1 (теория излучения «структурного» акустического шума изложена в [14, 15]).

При разработке отраслевой методики измерения характеристик ЛАП, формирующихся в отсеке ГО на этапе пуска РН, необходимо учитывать, что акустическая энергия, которая генерируется в отсеке РД, трансформируется в энергию ЛАП в результате возбуждения вибрации (изгибных колебаний) корпусной конструкции ГО. Процесс истечения из сопла РД высокоскоростной струи раскаленных газов сопровождается передачей энергии на корпусную конструкцию ГО как в виде вибрации, возбуждающейся на корпусной конструкции сопла (вследствие отрыва пограничного слоя при истечении струи из сопла), так и в виде звуковых волн высокой интенсивности.

Энергия изгибных колебаний корпуса ГО (вибрационная энергия) трансформируется в энергию комплексного поля пульсаций давления, которое формируется в непосредственной близости от поверхности корпусной конструкции ГО. Под воздействием колебаний корпусной конструкции ГО возбуждаются колебания прилегающих к поверхности конструкции частиц воздушной среды, таким образом около поверхности корпуса ГО формируется комплексное акустическое поле (точнее ближняя зона этого поля). В качестве активной компоненты этого поля около поверхности ГО формируется поле звуковых пульсаций давления, а в качестве реактивной компоненты комплексного поля – поле псевдозвуковых (гидродинамических) пульсаций давления.

В поле звуковых пульсаций давления частицы среды перемещаются со скоростью, равной скорости звука, причем в дальней зоне поля энергия поля зву-

ковых пульсаций давления трансформируется в энергию излучаемых конструкцией звуковых волн («структурного» акустического шума). В то же время в поле псевдозвуковых (или гидродинамических) пульсаций давления среда ведет себя как несжимаемая. Поэтому при изгибных колебаниях корпусной конструкции ГО скорость распространения псевдозвуковых пульсаций давления определяется только скоростью их переноса при плавном перетекании колебательной энергии вдоль поверхности ГО (в непосредственной близости от нее: в поле псевдозвуковых пульсаций давления) или скоростью распространения так называемых «неоднородных акустических волн» [21].

При истечении турбулентной струи газа из сопла РД (либо при обтекании турбулентным потоком корпуса ГО) процесс генерации аэродинамического шума (вследствие отрыва пограничного слоя от обтекаемой поверхности) обусловлен формированием около обтекаемой турбулентным потоком поверхности двух полей: поля звуковых пульсаций давления и поля гидродинамических пульсаций давления.

Энергия поля звуковых пульсаций давления в дальней зоне акустического поля трансформируется в энергию излучаемых турбулентным потоком звуковых волн (шума аэродинамического происхождения).

Энергия гидродинамических пульсаций давления сконцентрирована около обтекаемой поверхностью и быстро затухает по мере удаления от этой поверхности. Причем гидродинамические пульсации давления переносятся в турбулентном потоке со скоростью локальной конвекции вихрей в турбулентном потоке (эта скорость значительно меньше скорости распространения звуковых волн в воздухе).

Таким образом, на этапе пуска РН при изгибных колебаниях (вибрации) корпуса ГО около поверхности корпуса ГО формируется комплексное поле, которое можно подразделить на активную и реактивную компоненты поля: соответственно, поле звуковых пульсаций давления и поле гидродинамических пульсаций давления.

Аналогичным образом отрыв пограничного слоя (в процессе обтекания корпуса ГО турбулентным воздушным потоком) приводит к формированию около поверхности корпуса ГО комплексного поля пульсаций давления. Это комплексное поле подразделяется на активную и реактивную составляющие, которым соответствуют два поля пульсаций давления: звуковых и гидродинамических (или псевдозвуковых) пульсаций давления. Энергия поля звуковых пульсаций давления трансформируется в энергию звукового излучения аэродинамического происхождения. Энергия поля гидродинамических (или псевдозвуковых) пульсаций давления сконцентриро-

вана в пределах турбулентного потока (который формируется на этапе пуска РН при обтекании поверхности ГО воздушным потоком), причем чисто реактивное поле гидродинамических (или псевдозвуковых пульсаций давления) может быть представлено как поле «неоднородных» акустических волн (в виде решение уравнения Гельмгольца, в котором вещественный волновой вектор заменен на комплексный волновой вектор: $\vec{\xi} + i\vec{\alpha}$). Скорость распространения неоднородных акустических волн (псевдозвуковых пульсаций давления) определяется только скоростью их переноса в турбулентном потоке.

Разделить эти две составляющие комплексного акустического поля (измерить «по отдельности» характеристики активной и реактивной составляющих комплексного акустического поля) можно именно с помощью метода АИ.

Данная работа была проведена с целью экспериментального исследования метрологических возможностей метода АИ при моделировании инженерных отраслевых проблем РКО. В частности, в РКО одной из принципиальных проблем является определение низкочастотных характеристик комплексных ЛАП, формирующихся на этапе пуска РН в отсеке ГО. Причем нижняя граничная частота диапазона, в котором обычно проводятся испытания КА, составляет 22,4 Гц.

Однако проведение акустических измерений и испытаний на реальном объекте (в отсеке ГО реальной ракеты, либо полномасштабного макета РН) сопряжено со значительными финансовыми и организационными проблемами. Поэтому проведение экспериментальных исследований основывается на моделировании (на основе теории подобия) реальных источников акустического излучения двух типов (по отдельности): либо источника «структурного» шума, либо источника аэродинамического шума.

В реальной ситуации комплексное ЛАП формируется в отсеке ГО, вследствие изгибных колебаний корпусной конструкции ГО. В результате изгибных колебаний около поверхности корпуса ГО формируются поля пульсаций давления двух видов (звуковых и псевдозвуковых). При этом в свободном пространстве между корпусами ГО и КА (то есть в щелевидной полости) формируется ЛАП.

Чтобы в заглушенной акустической камере АО «Корпорация «ВНИИЭМ» смоделировать формирование ЛАП (в щелевидной полости отсека ГО), в качестве источника «структурного» акустического шума целесообразно использовать цилиндрическую оболочку, изгибные колебания которой возбуждаются источником вибрации. При изгибных колебаниях цилиндрической оболочки вибрационная энергия трансформируется в энергию «структурного» (вибрационного) шума, который излучается оболочкой.

В соответствии с результатами анализа возможных инженерных решений, в качестве наиболее простой и эффективной модели, с помощью которой можно моделировать процесс излучения структурного (вибрационного) шума корпусной конструкцией ГО, целесообразно использовать металлическую цилиндрическую оболочку, используемую в качестве корпусной конструкции серийного электродвигателя типа ДА 37-2К. Вес электродвигателя составляет 400 кг; частота вращения вала – 3000 1/мин; габаритные размеры корпусной конструкции: диаметр – 400 мм, длина – 700 мм. При работе электродвигателя (в режиме холостого хода: без нагрузки на валу) вибрационная энергия передается на цилиндрическую оболочку (корпусную конструкцию), в результате эта вибрационная энергия трансформируется в энергию изгибных колебаний цилиндрической оболочки (корпусной конструкции электродвигателя). При этом габаритные размеры измерительных поверхностей подбираются в соответствии с теорией подобия таким образом, чтобы соотношение между расстоянием от источника звука до точки измерения и длиной волны звука было одинаковым для реального ЛАП (которое формируется в отсеке ГО) и поля, формирующегося в акустической камере (при излучении структурного шума цилиндрической оболочкой).

В соответствии с изложенным, для проведения экспериментального исследования процесса формирования акустического поля, обусловленного излучением структурного шума корпусной конструкцией ГО, в качестве источника звука, с помощью которого моделируется излучение широкополосного структурного шума, была использована цилиндрическая оболочка, используемая в качестве корпусной конструкции электродвигателя. Корпусная конструкция электродвигателя (цилиндрическая оболочка) была установлена вертикально на массивном виброизолированном фундаменте в центре заглушенной акустической камеры (очередная периодическая аттестация камеры была проведена в декабре 2019 г.). Для измерения характеристик комплексного акустического поля, формирующегося в камере, вследствие излучения структурного шума цилиндрической оболочкой, использовался метод АИ.

Для проведения интенсивметрических измерений, в соответствии со стандартом [22], был использован четырехканальный анализатор типа Scadas Mobile (производство фирмы LMS Siemens Business, Бельгия) с двухмикрофонным интенсивметрическим зондом типа 50AI-L (производство фирмы G.R.A.S. Sound&Vibration, Дания).

Расстояние между двумя микрофонами в зонде фиксируется с помощью специальной «проставки», длина которой (l_m) варьируется от 25 до 100 мм.

Интенсивметрические измерения были проведены на двух измерительных поверхностях. В качестве формы измерительной поверхности был выбран прямоугольный параллелепипед: с габаритными размерами: $0,75 \times 0,75 \times 0,9$ м и $1,4 \times 1,4 \times 1,4$ м (соответственно, измерительные поверхности № 1-S и № 2-S).

Результаты интенсивметрических измерений на этих двух измерительных поверхностях используются для исследования структуры активной и реактивной составляющих комплексного акустического поля, формирующегося в акустической камере, а также для оценки метрологической эффективности применения метода АИ для раздельного определения акустических характеристик активной и реактивной компонент комплексного акустического поля. Это поле формируется в камере в результате изгибных колебаний цилиндрической оболочки. Энергия изгибных колебаний оболочки (вибрационная энергия) трансформируется в энергию комплексного поля пульсаций давления, которое формируется в непосредственной близости от поверхности цилиндрической оболочки.

Под воздействием изгибных колебаний цилиндрической оболочки возбуждаются колебания частиц воздушной среды, прилегающих к поверхности оболочки. Таким образом, около поверхности корпуса ГО формируется комплексное акустическое поле (точнее ближняя зона этого поля). В качестве активной компоненты этого поля около поверхности корпусной конструкции формируется поле звуковых пульсаций давления, а в качестве чисто реактивной компоненты комплексного поля – поле псевдозвуковых (гидродинамических) пульсаций давления.

Как отмечено в разделе 1, энергия поля псевдозвуковых пульсаций давления не трансформируется в энергию поля звуковых волн, поскольку вследствие эффекта АКЗ это поле существует только в ближней зоне в виде гидродинамических (псевдозвуковых) пульсаций давления (на низких частотах воздушная среда утрачивает упругие свойства и ведет себя как несжимаемая среда). Поле псевдозвуковых пульсаций давления является чисто реактивным полем. В этом поле акустическая энергия не распространяется в пространстве (так как нет волнового движения), а плавно перетекает вдоль поверхности оболочки (корпуса электродвигателя) в объеме, занимаемом присоединенной массой воздушной среды.

Таким образом, при работе электродвигателя в результате возбуждения изгибных колебаний корпусной конструкции (цилиндрической оболочки) в ближней зоне поля формируется комплексное акустическое поле. В этом комплексном поле имеются две составляющие: активная и реактивная составляющая. При изгибных колебаниях цилиндрической

оболочки около ее поверхности возбуждаются пульсации давления двух типов: звуковые пульсации давления и псевдозвуковые пульсации давления.

Энергия поля звуковых пульсаций давления трансформируется в энергию поля звуковых волн (структурного звука), излучаемых краями цилиндрической оболочки (колебания которых не компенсируются противофазными колебаниями соседних участков оболочки). Это поле классифицируется как активная компонента комплексного акустического поля.

Энергия поля псевдозвуковых пульсаций давления плавно перекачивается около поверхности цилиндрической оболочки: от участка среды, прилегающего к одной полуволне, к участку среды, прилегающему к соседней (противофазной) полуволне (и обратно). Таким образом, энергия колебаний цилиндрической оболочки передается частицам среды, прилегающим к конструкции, и трансформируется в кинетическую энергию присоединенной массы среды, прилегающей к поверхности цилиндрической оболочки. Поле псевдозвуковых (гидродинамических) пульсаций давления классифицируется как чисто реактивная компонента акустического поля. Это поле может быть также классифицировано, как ближнее поле «неоднородных» акустических волн [21]. Энергия поля псевдозвуковых пульсаций давления сконцентрирована рядом с поверхностью цилиндрической оболочки (в пределах ближней зоны поля).

В соответствии с изложенным, при изгибных колебаниях цилиндрической оболочки в низкочастотном диапазоне (ниже критической частоты) формируется комплексное акустическое поле. В ближней зоне комплексного поля акустическая энергия частично переносится звуковыми волнами (активная компонента поля). Кроме того, часть энергии (а именно энергия реактивной компоненты поля) плавно перекачивается около поверхности цилиндрической оболочки (корпусной конструкции) в виде кинетической энергии присоединенной массы среды (при этом энергия реактивного поля не распространяется в среде).

Определение характеристик этого комплексного акустического поля возможно только с использованием метода АИ. При измерении уровней звукового давления в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц) микрофон не может различать физическую природу акустического поля, поэтому и активная и реактивная компоненты поля оказывают на мембрану практически одинаковое динамическое воздействие. Вследствие этого, в результате измерений давления звука уровни активной и реактивной компонент поля будут суммироваться.

В то же время при измерении уровней интенсивности звука определяются по отдельности значения

активной и реактивной компонент комплексного поля. Для вычисления значений активной и реактивной компонент интенсивности в программном обеспечении измерительного прибора используются формулы (1) и (2). На основании результатов измерений уровней давления в двух точках поля с помощью программного обеспечения прибора вычисляются значения этих двух компонент поля.

На каждой из пяти граней измерительной поверхности (прямоугольного параллелепипеда) измерения проводились (с помощью двухмикрофонного зонда) в шести измерительных точках. Результаты измерений по каждой грани усреднялись. Таким образом, с помощью программного обеспечения интенсивметрических измерений может быть определена направленность излучения в комплексном акустическом поле, которое формируется в результате излучения структурного шума цилиндрической оболочкой (корпусом электродвигателя).

4. Результаты экспериментальных исследований интенсивметрических характеристик акустических полей, формирующихся в заглушенной акустической камере

4.1. Результаты исследования характеристик комплексного акустического поля, формирующегося при изгибных колебаниях цилиндрической оболочки. При проведении интенсивметрических измерений в комплексном акустическом поле программное обеспечение прибора Scadas Mobile обеспечивает возможность определения таких основных характеристик акустического поля, как: звуковое давление и мощность звука; активная и реактивная компоненты интенсивности звука, а также индексы акустического поля. Причем с помощью индекса «Давление – Интенсивность» (F_2), в частности, определяется степень реактивности комплексного акустического поля.

При проведении измерений в низкочастотном диапазоне метод АИ обладает рядом преимуществ по сравнению с методами, предусматривающими измерение уровней звукового давления. К наиболее важным преимуществам метода АИ следует отнести: возможность отдельного измерения характеристик активной и реактивной компонент комплексного акустического поля, а также возможность проведения корректных измерений (с контролируемой погрешностью) в ближней зоне акустического поля.

В программу экспериментальных исследований метрологических возможностей метода АИ были включены измерения в комплексном акустическом поле, которое формируется при излучении «структурного» акустического шума цилиндрической оболочкой. В качестве такого источника чисто структур-

ного звука был использован серийный электродвигатель, при работе которого возбуждались изгибные колебания корпусной конструкции (цилиндрической оболочки). Таким образом, по аналогии с излучением структурного шума корпусной конструкцией ГО, моделировалось излучение структурного (вибрационного) шума корпусной конструкцией электродвигателя (цилиндрической оболочкой).

При этом в низкочастотном диапазоне (ниже 100 – 160 Гц) излучение звука цилиндрической оболочкой (корпусом электродвигателя) можно рассматривать как легитимную модель излучения «структурного» звука корпусом ГО (на этапе пуска РН).

Как отмечено в разделе 1, в низкочастотном диапазоне при изгибных колебаниях корпусной конструкции (имеющей ограниченные габаритные размеры), вибрационная энергия трансформируется в энергию пульсаций давления двух типов: звуковых и псевдозвуковых пульсаций давления. Следовательно, в результате корректных акустических измерений в комплексном акустическом поле должны быть определены характеристики двух низкочастотных составляющих этого поля: активной и реактивной составляющей.

Таким образом, при проведении интенсивметрических измерений в заглушенной акустической камере определяются характеристики комплексного акустического поля, которое формируется в объеме камеры при работе электродвигателя. При этом энергия поля изгибных волн (формирующегося в корпусной конструкции электродвигателя) трансформируется в энергию «структурного» шума, излучаемого «вибрирующим» корпусом электродвигателя. Кроме того, под воздействием широкополосного «структурного» шума возбуждаются низкочастотные моды собственных колебаний объема камеры на ее первых резонансных (собственных) частотах.

В результате возбуждения в низкочастотном диапазоне (ниже 160 – 200 Гц) первых мод собственных колебаний объема камеры в камере формируются чисто реактивные поля стоячих звуковых волн (на каждой собственной частоте объема камеры). Таким образом, в низкочастотном диапазоне в камере формируются акустические поля двух типов: комплексное акустическое поле, обусловленное излучением широкополосного структурного шума, и чисто реактивное поле стоячих звуковых волн (которое возбуждается на первых собственных частотах объема камеры).

В низкочастотном диапазоне в гидродинамической ближней зоне, расположенной рядом с корпусной конструкцией ГО, среда утрачивает упругие свойства и ведет себя как несжимаемая. Поэтому в гидродинамической ближней зоне не могут возбуждаться и рас-

пространяться звуковые волны, в этой зоне формируется поле гидродинамических (или псевдозвуковых) пульсаций давления. Поле псевдозвуковых пульсаций давления квалифицируется как чисто реактивное поле. В отличие от звуковых волн, которые распространяются в воздухе со скоростью звука (340 м/с), псевдозвуковые пульсации давления распространяются («перекачиваются») между противофазными участками среды (то есть, смежными участками конструкции, которые колеблются в противофазе) со значительно меньшей скоростью.

Результаты интенсивметрических измерений характеристик комплексного акустического поля, формирующегося в заглушенной акустической камере при работе источника структурного шума [корпуса серийного электродвигателя (типа ДА 37-2К)], установленного в центре камеры, представлены в табл. 1. На основании результатов низкочастотных интенсивметрических измерений (в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами от 63 до 1000 Гц) определена структура комплексного акустического поля в ближней зоне источника структурного шума (корпуса электродвигателя). В качестве критериальной характеристики структуры акустического поля (в ближней зоне поля) используется величина скорости спада с расстоянием уровней интенсивности звука: по отдельности для активной (ΔL_I^{ac}) и реактивной (ΔL_I^r) компонент интенсивности.

Эти величины определялись на основании сопоставления результатов измерений уровней интенсивности звука на двух измерительных поверхностях (№ 1-S и № 2-S). Согласно результатам измерений, цилиндрический корпус электродвигателя типа ДА 37-2К излучает широкополосный структурный шум со сплошным спектром. Кроме того, в спектрах активной и реактивной компонент интенсивности звука (столбцы 2 и 4) в третьоктавной полосе частот со среднегеометрической частотой 100 Гц выделяется тональная составляющая. Появление этой тональной составляющей обусловлено возбуждением первых собственных резонансов объема камеры. Из сопоставления результатов измерений следует, что в низкочастотном диапазоне (ниже 200 Гц) уровень реактивной компоненты интенсивности звука существенно превышает уровень активной компоненты. Этот результат обусловлен влиянием эффекта АКЗ на эффективность акустического излучения в низкочастотном диапазоне (вследствие взаимной компенсации акустического излучения соседних участков корпусной конструкции, колеблющихся в противофазе [14]).

Помимо комплексного акустического поля в объеме камеры (на одной из первых собственных

частот: 100 Гц) формируется чисто реактивное поле стоячих волн. Согласно результатам дополнительных измерений, в широкополосном спектре реактивной составляющей интенсивности звука в третьоктавной полосе со среднегеометрической частотой 50 Гц выделяется тональная составляющая с уровнем интенсивности: $(L_I^R)_1 = 63,5$ дБ. Эта тональная составляющая также возбуждается на одной из первых собственных частот объема камеры. Согласно результатам измерений, значения индекса (F_2) в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 50 и 100 Гц соответствуют чисто реактивному полю стоячих акустических волн.

На каждой из первых собственных (резонансных) частот объема камеры (в частности, в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами 50; 100 Гц) формируется чисто реактивное поле стоячих звуковых волн. Таким образом, в камере в результате излучения структурного шума корпусом электродвигателя формируется комплексное

акустическое поле, а в результате возбуждения мод собственных колебаний объема камеры формируются чисто реактивные поля стоячих звуковых волн. Причем в комплексном акустическом поле энергия поля гидродинамических (псевдозвуковых) пульсаций давления трансформируется в энергию ближней зоны реактивной компоненты комплексного поля (формирующейся в непосредственной близости от поверхности корпусной конструкции). В то же время энергия звуковых пульсаций давления в дальней зоне поля трансформируется в энергию активной компоненты комплексного поля (то есть в энергию бегущих звуковых волн), а также в энергию поля стоячих звуковых волн.

Согласно результатам измерений (представленным в табл. 1), в низкочастотном диапазоне (ниже третьоктавы со среднегеометрической частотой 200 Гц) уровни интенсивности звука в реактивных полях стоячих акустических волн (на собственных частотах камеры) существенно выше, чем уровень интенсивности

Таблица 1

Результаты измерения (методом АИ) акустических характеристик комплексного поля, которое формируется в акустической камере в результате излучения «структурного» шума цилиндрической оболочки

Частота (f_c), Гц	Уровни интенсивности звука, дБ				Уровни звукового давления, дБ
	Активная компонента интенсивности звука		Реактивная компонента интенсивности звука		
	$(L_I^{Ac})_1$, дБ	ΔL_I^{Ac} , дБ	$(L_I^R)_1$, дБ	ΔL_I^R , дБ	
1	2	3	4	5	6
63	23,5	7,5	34,0	9,0	8,5
80	29,0	9,0	36,0	14,0	12,0
100	43,0	10,0	50,0	12,0	14,0
125	28,5	8,5	34,0	12,0	15,5
160	41,0	8,0	45,0	10,0	8,5
200	43,5	6,0	46,5	12,5	8,5
250	42,0	5,5	47,0	9,0	6,0
315	40,5	5,0	42,0	8,0	5,5
400	46,5	4,5	43,0	7,5	6,0
500	43,5	5,5	41,0	7,0	5,5
630	42,5	4,5	38,0	5,5	5,0
800	42,0	5,0	37,0	5,5	5,5
1000	44,0	4,5	42,0	5,0	5,5

Примечание: f_c – среднегеометрические частоты третьоктавных частотных полос, Гц; ΔL_I^{Ac} – разность уровней активной компоненты интенсивности звука $(L_I^{Ac})_1$ и $(L_I^{Ac})_2$, измеренные в камере, соответственно, на двух измерительных поверхностях (а именно, № 1-S и № 2-S): $\Delta L_I^{Ac} = (L_I^{Ac})_1 - (L_I^{Ac})_2$; ΔL_I^R – разность уровней реактивной компоненты интенсивности звука $(L_I^R)_1$ и $(L_I^R)_2$, измеренных в камере, соответственно, на двух измерительных поверхностях (а именно, № 1 и № 2): $\Delta L_I^R = (L_I^R)_1 - (L_I^R)_2$; ΔL_p – разность уровней звукового давления (L_p^1 и L_p^2), измеренных в камере, соответственно, на двух измерительных поверхностях (а именно, № 1-S и № 2-S): $\Delta L_p = L_p^1 - L_p^2$.

реактивной составляющей в комплексном акустическом поле. Это комплексное поле формируется в результате излучения широкополосного структурного акустического шума при изгибных колебаниях корпуса электродвигателя.

Согласно результатам измерений, представленным в табл. 1 (столбцы 2 и 4), в низкочастотном диапазоне (ниже 200 Гц) в комплексном акустическом поле, формирующемся в результате излучения структурного шума корпусом электродвигателя, уровни реактивной компоненты интенсивности звука существенно выше, чем уровни активной компоненты интенсивности звука (благодаря эффекту АКЗ). Далее с ростом частоты колебаний уровни реактивной компоненты интенсивности звука снижаются, а уровни активной компоненты интенсивности звука растут. Поэтому в диапазоне средних и высоких частот ($f \geq 400$ Гц) в комплексном акустическом поле (которое формируется при работе источника структурного шума) уровни активной компоненты интенсивности звука существенно превышают уровни реактивной компоненты интенсивности звука.

При измерении уровней звукового давления в низкочастотном диапазоне (ниже 200 Гц) микрофон не в состоянии отличить реактивную компоненту акустического поля от активной компоненты [16]. Поэтому результаты измерений соответствуют суммарному уровню двух компонент поля (активной и реактивной).

Следовательно, в низкочастотном диапазоне в ближней зоне акустического поля невозможно провести измерения уровней звукового давления. Измерить можно только уровни интенсивности звука (методом АИ).

Таким образом, при измерении уровней звукового давления в комплексном акустическом поле результаты низкочастотных акустических измерений искажаются вследствие влияния систематической погрешности, которая обусловлена формированием реактивной компоненты в комплексном акустическом поле.

При измерении уровней интенсивности звука можно выделить только активную компоненту комплексного акустического поля, за счет этого в низкочастотном диапазоне устраняется влияние, которое оказывает на результаты измерений систематическая погрешность (обусловленная формированием в режиме АКЗ реактивной компоненты комплексного поля в виде поля псевдозвуковых пульсаций давления).

Следует отметить, что в заглушенной акустической камере АО «Корпорация «ВНИИЭМ» толщина слоя звукопоглощающего покрытия (на всех ограждающих поверхностях за исключением звуко-

отражающего пола камеры) составляет 0,3 м. Поэтому в низкочастотном диапазоне (ниже 250 Гц), когда длина волны звука превышает 1,36 м, эффективность поглощения звука незначительна (так как толщина покрытия меньше четверти длины звуковой волны ($\lambda_{\text{гол}}/4$) в материале покрытия). Таким образом, в камере на первых собственных частотах возбуждаются собственные моды колебаний объема камеры и, в результате суммирования прямых и отраженных (от ограждающих поверхностей камеры) звуковых волн, формируется поле стоячих звуковых волн.

В соответствии с изложенным, в низкочастотном диапазоне вследствие изгибных колебаний цилиндрической оболочки (корпуса электродвигателя) формируется комплексное акустическое поле (поле структурных волн). В этом поле с помощью метода акустической интенсивности определяются по отдельности спектральные уровни для активной и реактивной компоненты интенсивности звука.

Кроме того, на первых собственных частотах объема камеры формируется чисто реактивное поле стоячих звуковых волн. Акустическая характеристика этого поля также определяется с помощью метода акустической интенсивности.

Благодаря разделению определения акустических характеристик активной и реактивной компонент комплексного поля в низкочастотном диапазоне устраняется систематическая погрешность измерений. Эта погрешность обусловлена суммированием уровней звукового давления (в активном звуковом поле) и уровней псевдозвуковых пульсаций давления (в реактивном поле) [16]. С помощью интенсивностических измерений определяется акустическая характеристика (спектральные уровни интенсивности звука) активной компоненты ЛАП (то есть поля звуковых волн). С помощью этой акустической характеристики локального поля определяются параметры динамического воздействия на КА, обусловленного формированием ЛАП в отсеке ГО.

4.2. Результаты исследования характеристик комплексного акустического поля, формирующегося при излучении шума аэродинамического происхождения источником звука типа ОИШ-МВ-1. В программу экспериментальных исследований метрологических возможностей метода АИ на втором этапе работы были включены измерения акустических характеристик комплексного акустического поля, которое формируется в акустической камере при работе источника аэродинамического шума: образцового источника звука типа ОИШ-МВ-1. Результаты этих экспериментальных исследований представлены в [23], характеристики комплексного акустического поля были измерены на двух измерительных поверхностях (№ 1 и № 2). При работе источника звука типа

ОИШ-МВ-1 излучается широкополосный аэродинамический шум с равномерным спектром.

В результате экспериментальных исследований было установлено (табл. 2), что в комплексном акустическом поле, которое формируется в объеме заглушенной акустической камеры при работе источника звука типа ОИШ-МВ-1, в низкочастотном диапазоне (с верхней граничной частотой 400 Гц) доминирует реактивная компонента интенсивности звука. Анализ результатов измерений показывает, что в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами от 25 до 125 Гц разность уровней реактивной и активной компонент интенсивности звука $[\Delta L_7^{R-Ac}]_1$ варьируется в пределах от 13 до 31,5 дБ. В то же время в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами от 160 до 400 Гц величина этой разности уровней $[\Delta L_7^{R-Ac}]_1$ варьируется в пределах от 2,5 до 10 дБ.

Причем в низкочастотном диапазоне (в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами от 25 до 125 Гц) реактивная компонента интенсивности звука быстро затухает при увеличении расстояния между источником звука и измерительной поверхностью. А именно в этом диапазоне частот разность уровней интенсивности звука (для реактивной компоненты комплексного акустического поля), измеренных на измерительных поверхностях № 1 и № 2, варьируется в пределах от 10,5 до 24 дБ. Следовательно, влияние низкочастотных тональных составляющих в спектре реактивной компоненты интенсивности звука проявляется только в непосредственной близости от источника звука и при небольшом удалении от него.

В табл. 2 представлены результаты измерений акустических характеристик комплексного акустического поля, которое формируется в акустической камере при работе источника звука типа ОИШ-МВ-1. Согласно полученным результатам во всех трех характеристиках (то есть в широкополосных спектрах активной и реактивной компоненты интенсивности звука и в спектре звукового давления) выделяется тональная составляющая (в третьоктавной полосе частот со среднегеометрической частотой 31,5 Гц).

Согласно результатам, приведенным в работе [23], в низкочастотном диапазоне на первых собственных частотах камеры возбуждаются моды собственных колебаний.

При этом в частотной характеристике комплексного акустического поля, формирующегося в камере, выделяются тональные составляющие. Согласно [23], на первых собственных частотах в камере формируется чисто реактивное поле стоячих

звуковых волн. Таким образом, в низкочастотном диапазоне в объеме камеры помимо комплексного акустического поля (которое формируется в результате трансформации энергии звуковых и псевдозвуковых пульсаций давления в энергию активной и реактивной компонент поля) формируется чисто реактивное поле стоячих звуковых волн.

Механизм генерации шума аэродинамического происхождения принципиально отличен от механизма генерации «структурного» (или «вибрационного») шума. Как отмечено в [15, 16, 23, 24], в низкочастотном диапазоне при прохождении потока через межлопаточные каналы источника звука в ближней зоне акустического поля активная и реактивная компоненты акустического поля формируются вследствие возбуждения, соответственно, звуковых и псевдозвуковых (гидродинамических) пульсаций давления в турбулентном пограничном слое. Эти пульсации возбуждаются в процессе отрыва турбулентного пограничного слоя от стенок межлопаточных каналов (то есть от лопаток) колеса вентилятора. Причем в низкочастотном диапазоне (в особенности при $f \leq 100$ Гц) интенсивность псевдозвуковых пульсаций давления существенно превышает интенсивность звуковых пульсаций давления. Поэтому в ближней зоне поля уровни интенсивности звука в реактивных полях выше уровней интенсивности звука в активных акустических полях.

В низкочастотном диапазоне физические процессы, которыми обусловлено формирование ближней зоны комплексного акустического поля при прохождении воздушного потока через межлопаточные каналы рабочего колеса вентилятора, по своей природе достаточно близки к процессам формирования ближней зоны комплексного акустического поля при сверхзвуковом обтекании ГО воздушным потоком.

При работе источника звука типа ОИШ-МВ-1 (центробежного вентилятора с вперед загнутыми лопатками) источниками аэродинамического шума являются системы вихрей, формирующихся в процессе отрыва турбулентного пограничного слоя при прохождении воздушного потока через межлопаточные каналы колеса.

При прохождении потока через межлопаточные каналы колеса, вследствие срыва вихрей при отрыве пограничного слоя от поверхности лопатки на стенках межлопаточных каналов формируется комплексное поле пристеночных пульсаций давления двух видов: звуковых и псевдозвуковых. Причем энергия поля звуковых пульсаций давления трансформируется в энергию «вихревого» поля (то есть поля звуковых волн), которое формируется в дальней зоне акустического поля. В то же время энергия чисто реак-

тивного поля псевдозвуковых пульсаций давления не может трансформироваться в энергию волнового поля, эта энергия сконцентрирована около поверхности лопатки и быстро затухает по мере удаления микрофона от источника псевдозвуковых пульсаций.

Следует отметить, что в табл. 2 использованы те же условные обозначения, что и в табл. 1.

Как отмечено в [15, 16, 23, 24], в ближнем поле псевдозвуковых пульсаций давления энергия сконцентрирована около обтекаемой турбулентным потоком поверхности лопатки.

Поле псевдозвуковых пульсаций давления может быть классифицировано как поле неоднородных акустических волн, в котором колебательная энергия этих пульсаций давления может переноситься вдоль обтекаемой поверхностью лопатки со скоростью локальной конвекции вихрей в турбулентном потоке. Причем в поле неоднородных волн скорость переноса энергии псевдозвуковых пульсаций давления значительно меньше скорости распространения звуковых волн в среде.

Как отмечено выше, согласно результатам экспериментальных исследований низкочастотных интенсивностных характеристик поля [23], в объеме акустической камеры, помимо комплексного акустического поля (формирующегося при работе источника звука типа ОИШ-МВ-1) формируется чисто реактивное поле стоячих акустических волн.

Аналогичным образом при обтекании корпуса ГО сверхзвуковым турбулентным воздушным потоком формируется поле звуковых пульсаций давления. Энергия этого активного поля в дальней зоне трансформируется в энергию поля звуковых волн, которые излучаются в результате вихреобразования в турбулентном потоке. Кроме того, вследствие отрыва пограничного слоя от поверхности ГО, около обтекаемой поверхности ГО формируется реактивное поле псевдозвуковых пристеночных пульсаций давления $[p^H]$. Энергия этого поля сконцентрирована около поверхности ГО, причем энергия псевдозвуковых пульсаций давления не может трансформироваться в энергию звуковых волн. Энергия этих пульсаций давления переносится вдоль поверхности ГО со скоростью локальной конвекции вихрей в турбулентном потоке, который обтекает корпус ГО.

Таким образом, результаты акустических измерений (с использованием метода АИ, приведенные в табл. 1 и 2) могут быть использованы для анализа процессов, которыми обусловлено формирование ЛАП в полости между корпусами ГО и КА.

Анализ результатов измерений показывает, что в низкочастотном диапазоне в комплексном акустическом поле доминирует реактивная компонента поля, однако реактивная компонента быстро затухает при удалении от источника звука (типа ОИШ-МВ-1).

Таблица 2

Результаты измерения (методом АИ) акустических характеристик комплексного акустического поля, которое формируется в камере при работе источника аэродинамического шума типа ОИШ-МВ-1

Частота (f_c), Гц	Уровни интенсивности звука				Уровни звукового давления	
	Активная компонента		Реактивная компонента		L_p^1 , дБ	L_p^2 , дБ
	$(L_I^{Ac})_1$, дБ	$(L_I^{Ac})_2$, дБ	$(L_I^R)_1$, дБ	$(L_I^R)_2$, дБ		
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
25	93,5	67,5	108,5	73,0	84,0	67,0
31,5	104,5	81,0	122,0	96,0	103,0	80,5
40	92,0	62,0	107,0	85,0	92,0	70,0
50	76,0	66,0	103,5	84,0	90,5	71,5
63	84,0	70,5	101,5	83,5	90,0	73,0
80	81,5	73,5	100,0	83,5	88,0	75,5
100	78,0	76,0	98,5	88,0	89,0	79,5
125	80,5	77,0	95,0	83,5	87,0	78,5
160	81,0	76,0	91,0	82,0	85,0	77,0
200	80,5	75,0	89,0	76,5	83,0	76,0
250	80,0	73,5	87,0	77,5	82,0	74,5
315	79,5	72,5	84,0	73,0	81,0	74,0
400	79,5	72,5	82,0	75,5	81,0	74,5

Кроме того, в камере возбуждаются моды собственных колебаний объема (на первых собственных частотах). При этом в камере на одной из первых собственных частот формируется чисто реактивное поле стоячих звуковых волн. Согласно результатам измерений (приведенным в табл. 2), вследствие формирования поля стоячих волн, в спектре шума появляется тональная составляющая (в третьоктавной полосе со среднегеометрической частотой 31,5 Гц). Согласно результатам измерений значения индекса (F_2), акустическое поле в третьоктавной полосе частот со среднегеометрической частотой 31,5 Гц соответствует чисто реактивному полю стоячих акустических волн.

Таким образом, для проведения корректных измерений характеристик комплексного акустического поля и чисто реактивного поля стоячих звуковых волн следует использовать метод АИ, который обеспечивает возможность раздельного измерения характеристик комплексного акустического поля (активной и реактивной компонент поля) и характеристик чисто реактивных полей стоячих неоднородных акустических волн.

5. Результаты исследования физических процессов, которыми обусловлено возбуждение низкочастотных тональных составляющих в спектре локальных акустических полей

5.1. Анализ результатов экспериментальных исследований «эффекта заполнения» в отсеке головного обтекателя (на основе литературных источников). Около 30 лет назад опубликованы первые работы (в частности, [25, 26]), посвященные исследованию «эффекта заполнения» или «фактора заполнения» в отсеке ГО. В этих работах, в качестве основного практического применения результатов экспериментальных исследований эффекта, рассматривалось применение этих результатов в РКП при проведении наземных испытаний КА на стойкость к воздействию звуковых волн высокой интенсивности. ЛАП, которое формируется в отсеке ГО и оказывает динамическое воздействие на КА (на этапе пуска РН), имитируется на испытательном стенде с помощью электропневматических источников звука.

В соответствии с [26], результаты исследований эффекта следует использовать в документах NASA для корректировки нормативных значений уровней звукового давления в акустическом поле, которое формируется в реверберационной камере (при проведении испытаний КА на испытательном стенде). С помощью размещенных в камере источников звука на стенде обеспечивается имитация пусковой динамической нагрузки, которая обусловлена воздействи-

ем на КА звуковых волн высокой интенсивности. Результаты экспериментальных исследований [25], получены при использовании ГО Atlas/Centaur (диаметр цилиндрической части – 14 футов), в котором размещались упрощенные макетные образцы КА для проведения экспериментальных исследований эффекта (измерения уровней звукового давления в «пустом» отсеке ГО и в щелевидной полости между корпусами ГО и КА). Исследования проводились в 1994 г. в Центре NASA Lewis Research Center (LeRC) при участии General Dynamics Space Systems Division (GDSSD).

Макетные образцы КА использовались в эксперименте для имитации ЛАП, которые на практике формируются в отсеке ГО. ГО Atlas/Centaur был размещен в реверберационной камере, в которой формируется диффузное акустическое поле (с уровнем звукового давления – 147 дБ). Для формирования акустических полей высокой интенсивности в камере использованы мощные электропневматические источники звука.

В результате экспериментальных исследований установлено [25], что в «пустом» отсеке ГО в широкополосном спектре выделяется тональная составляющая (в третьоктавной полосе со среднегеометрической частотой 40 Гц), которая, согласно результатам расчетов, возбуждается на первой собственной частоте объема ГО (цилиндрической оболочки с диаметром – 4,3 м). Уровни звукового давления измерялись сначала в «пустом» отсеке ГО, а затем в отсеке, «заполненном» макетным образцом КА. Микрофон размещался в щелевидной полости между корпусами ГО и макета КА. В третьоктавной полосе со среднегеометрической частотой 40 Гц в широкополосном спектре уровней звукового давления выделялась тональная составляющая. Причем, согласно результатам измерений [25], в «пустом» отсеке ГО (без макета КА с диаметром 144 дюйма) уровень звукового давления этой тональной составляющей снизился на 5 дБ по сравнению с результатами измерений уровней давления в ЛАП (в щелевидной полости). Кроме того, исследования показали, что при уменьшении расстояния между корпусами ГО и КА уровень тональной составляющей в ЛАП увеличился.

Подробный анализ результатов экспериментальных исследований «эффекта заполнения», проведенных зарубежными специалистами, представлен в работе [27]. В документы NASA [25, 26] включена приближенная расчетная методика, с помощью которой может быть определена величина поправки, позволяющей учитывать влияние эффекта на параметры ЛАП. На основании этих результатов в стандарт NASA [26, 28] был включен расчет пара-

метров пускового динамического воздействия на КА с учетом влияния «эффекта заполнения» на величину нормативных значений уровней звукового давления в ЛАП, формирующемся в отсеке ГО.

При проведении стендовых наземных испытаний КА на стойкость к воздействию звуковых волн высокой интенсивности, документы NASA [26, 28] используются для определения параметров стендового динамического воздействия на КА. Как известно, в РФ эти испытания, как правило, проводятся в реверберационной акустической камере в соответствии со стандартом (ГОСТ Р 52862-2007 (МЭК 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). М.: Стандартиформ, 2008. 21 [1] с.)

В то же время, в работах [27, 29] корректность выводов, сделанных авторами работ [25, 26], ставится под сомнение. Причем в работах [27, 29] показано, что корректность допущений, использованных авторами работ [25, 26] при моделировании процесса формирования акустических полей в объеме отсека обтекателя ГО, не подтверждена результатами экспериментальных исследований.

Кроме того, авторами работ [25, 26] не рассматривался вопрос о метрологической корректности использованных методов акустических измерений. В то же время расчеты показывают, что в низкочастотном диапазоне ширина щелевидной полости (расположенной между корпусами ГО и КА), которая, как известно, не превышает 0,5 м, как правило, значительно меньше длины звуковой волны (в воздухе).

Анализ физических процессов, которыми обусловлено формирование ЛАП, показывает (раздел 1), что разработка корректной методики проведения низкочастотных акустических измерений в щелевидной полости (между корпусами ГО и КА) сопряжена с решением достаточно сложных метрологических проблем.

Во-первых, поскольку габаритные размеры щелевидной полости значительно меньше длины волны (в низкочастотном диапазоне), все измерения будут проводиться исключительно в ближней зоне акустического поля. В то же время, в соответствии с требованиями стандарта [12] для корректного определения уровней звукового давления в акустическом поле измерительный микрофон должен размещаться исключительно в дальней зоне акустического поля. Причем, в соответствии с этим стандартом микрофоны должны размещаться на расстоянии не менее 1 м от всех ограждающих конструкций измерительного помещения.

Кроме того, при разработке методики низкочастотных акустических измерений в РКП следует учитывать, что на этапе пуска РН в щелевидной полости формируется комплексное акустическое поле. Причем активная и реактивная компоненты комплексного поля представлены в виде, соответственно, поля звуковых пульсаций давления и поля псевдозвуковых (гидродинамических) пульсаций давления. Энергия активного поля звуковых пульсаций давления в дальней зоне поля трансформируется в энергию поля звуковых волн (активного акустического поля). Энергия реактивной компоненты комплексного поля представлена в виде энергии чисто реактивного поля «неоднородных» акустических волн. Согласно [16, 24], в диапазоне аномально низких частот при измерении уровней звукового давления микрофон не может отличить активную компоненту комплексного поля от реактивной компоненты. Поэтому при использовании стандартной методики измерений (то есть, в соответствии с [12]) может быть измерен только суммарный уровень двух компонент комплексного поля: активной и реактивной. На результаты измерений никак не влияют различия в физических природе этих компонент: волновой и гидродинамической, соответственно.

Дополнительные метрологические проблемы связаны с влиянием «эффекта заполнения» на результаты акустических измерений в отсеке ГО. Причем на результаты акустических измерений оказывает существенное влияние чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн, которое формируется в щелевидной полости на аномально низких первых собственных частотах этой полости.

Таким образом, для проведения низкочастотных акустических измерений в замкнутом объеме крайне ограниченного размера (а именно в щелевидной оболочке, размеры которой значительно меньше длины звуковых волн) достаточно сложно разработать методику измерений, при использовании которой обеспечивается метрологическая корректность результатов измерений в низкочастотном диапазоне (в особенности, ниже 100 Гц).

На рис. 3, *а* и *б* [30] представлены результаты моделирования физических процессов, которыми обусловлено возникновение «эффекта заполнения» в узкой щелевидной полости (расположенной между корпусами ГО и КА).

В соответствии с этой моделью в результате внешнего динамического воздействия на корпус ГО, оказываемого звуковыми волнами высокой интенсивности, возбуждаются изгибные колебания корпусной конструкции ГО, которая излучает структурный шум. При этом в щелевидной полости

(между корпусами ГО и КА) формируется локальное акустическое поле (рис. 3, *а*). Излучаемые корпусом КА звуковые волны (структурный шум) отражаются от конструктивных элементов КА (корпуса, солнечных батарей, антенны) и, в результате суммирования «прямой» волны (излучаемой корпусом ГО) и волны, отраженной от конструктивных элементов КА, в щелевидной полости формируется поле стоячих акустических волн (рис. 3, *б*).

Как отмечено выше, при использовании стандартной методики (в соответствии с [12]), для измерения низкочастотных характеристик акустического поля, сформированного в объеме щелевидной полости, будут получены некорректные результаты с непредсказуемыми величинами систематических погрешностей. Причем при проведении измерений уровней звукового давления в ближней зоне акустического поля величина систематических погрешностей измерений может достигать 10 дБ.

Таким образом, для проведения корректных низкочастотных акустических измерений в узкой щелевидной полости, расположенной между корпусами ГО и КА, может быть использована только эксклюзивная методика измерений, основанная на использовании метода АИ.

Анализ результатов экспериментальных исследований «эффекта заполнения» (в щелевидной полости), представленных в работах [25, 26, 28], показывает, что низкочастотные акустические измерения проводились (в объеме щелевидной полости) с принципиальными нарушениями требований международного стандарта [12]. Причем наиболее грубые нарушения базовых принципов акустической метрологии были обусловлены размещением микрофонов на измерительных поверхностях, расположенных в ближней зоне акустического поля и в непосредствен-

ной близости от жестких ограждающих поверхностей (которыми ограничен объем щелевидной полости).

В соответствии с изложенным, результаты экспериментальных исследований «эффекта заполнения», проведенных с принципиальными нарушениями требований международного стандарта [12], не могут служить реальным доказательством возникновения эффекта (при формировании ЛАП в щелевидной полости).

5.2. Анализ результатов исследования процесса возбуждения низкочастотных тональных составляющих акустического поля, формирующегося в щелевидной полости (между корпусами ГО и КА). Как было отмечено в разделе 5.1, согласно результатам экспериментальных исследований (с использованием ГО Atlas/Centaur, в котором размещались макетные образцы КА) [25], в спектральных характеристиках ЛАП, формирующихся в отсеке ГО на этапе пуска РН, выделяются низкочастотные тональные составляющие (в диапазоне частот 30 – 50 Гц). Согласно [25] появление в спектре этих низкочастотных тональных составляющих обусловлено «эффектом заполнения». Эффект зафиксирован в случае «заполнения» части свободного объема отсека ГО полезной нагрузкой (а именно КА). Экспериментальные результаты, которые были представлены в работе [24], получены в результате измерения уровней звукового давления с помощью анализатора спектра с микрофоном, размещенным (рис. 2, *а*) в ЛАП (в отсеке ГО Atlas/Centaur). Аналогичная методика была использована при проведении экспериментальных исследований [16] влияния «эффекта заполнения» на характеристику ЛАП (которое формируется в полости между корпусами ГО и КА), а также при проведении натурных измерений [18] характеристик ЛАП, формирующегося в отсеке ГО (рис. 2, *в*) на этапе пуска РН «Союз».

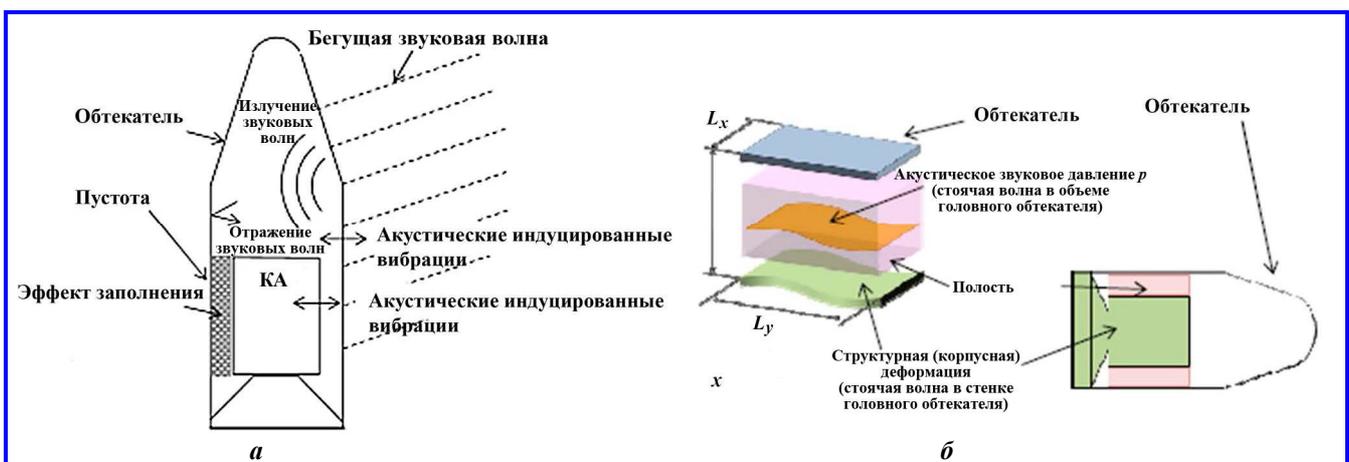


Рис. 3. Моделирование физических процессов, которыми обусловлен «эффект заполнения» при формировании ЛАП в щелевидной полости (между корпусами ГО и КА): *а* – схема формирования локального комплексного ЛАП в щелевидной полости; *б* – схема формирования поля стоячих звуковых волн в щелевидной полости (в результате суммирования «прямой» волны с волной, отраженной от КА)

Однако, как было отмечено во «Введении» (а также в разделах 2 и 5.1), при использовании такой методики измерений в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц) невозможно получить корректные экспериментальные результаты, поскольку условия, в которых проводились измерения, не соответствуют метрологическим требованиям стандарта [12]. Именно низкочастотные измерения проводились в ближней зоне акустического поля, при этом микрофон был размещен в непосредственной близости от жестких корпусных конструкций ГО и КА.

Причем, согласно [16, 24], микрофон в низкочастотном диапазоне не может отличить реактивную компоненту комплексного акустического поля от активной компоненты этого поля.

Поэтому корректные результаты измерений в ЛАП могут быть получены только с использованием метода АИ (методические аспекты практической реализации метода АИ рассмотрены в разделе 3). При проведении измерений интенсивностных характеристик (с использованием двухмикрофонного зонда) комплексного акустического поля, формирующегося в измерительном помещении, обеспечивается возможность раздельного определения характеристик как активной, так и реактивной компоненты комплексного акустического поля. При этом, в соответствии с [19, 20], используются расчетные формулы (1) и (2).

Результаты корректных измерений характеристик акустических полей, формирующихся в акустической камере при работе источника структурного шума (раздел 4.1) и при работе источника шума аэродинамического происхождения (раздел 4.2), при использовании метода АИ (в низкочастотном диапазоне), приведены в табл. 1 и 2.

Согласно результатам теоретического анализа (раздел 1) и экспериментальных исследований (разделы 4.1 и 4.2), появление низкочастотных тональных составляющих в широкополосном спектре комплексного акустического поля, по-видимому, обусловлено формированием в объеме камеры чисто реактивного поля стоячих «неоднородных» акустических волн (или поля псевдозвуковых пульсаций давления).

Как следует из результатов измерений (с использованием метода АИ) акустических характеристик ЛАП, формирующегося в акустической камере вследствие излучения структурного шума (при изгибных колебаниях корпуса электродвигателя), в низкочастотном диапазоне (ниже 400 Гц) уровни интенсивности реактивной компоненты ЛАП существенно превосходят уровни интенсивности активной компоненты этого поля (табл. 1). В то же время скорость спада уровней интенсивности реактивной компо-

ненты ЛАП с расстоянием (по мере удаления от источника шума) значительно больше, чем скорость спада (с расстоянием) уровней интенсивности активной компоненты интенсивности ЛАП.

Анализ результатов измерений (приведенных в табл. 1) показывает, что появление в акустическом поле тональных составляющих (в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 50 и 100 Гц) обусловлено формированием чисто реактивных полей стоячих акустических волн (в результате суммирования волн, излучаемых источником структурного шума, с волнами, отраженными от ограждающей конструкции камеры). Причем, в объеме камеры формируется два чисто реактивных поля: поле стоячих акустических волн и поле стоячих «неоднородных» акустических волн. Энергия поля звуковых пульсаций давления трансформируется в энергию поля стоячих акустических волн, а энергия поля псевдозвуковых (гидродинамических) пульсаций давления может быть представлена в виде поля стоячих неоднородных акустических волн.

Согласно результатам измерений в низкочастотном диапазоне (в особенности ниже 125 Гц) в помещении доминирует чисто реактивное поле стоячих неоднородных акустических волн (неоднородная волна распространяется по двум направлениям: вдоль поверхности корпусной конструкции электродвигателя и вдоль нормали к этой поверхности). Причем скорость распространения неоднородных акустических волн (в несжимаемой среде) значительно меньше скорости распространения звуковых волн в упругой среде (а именно в воздухе).

Для более детального исследования характеристик ближней зоны акустического поля, формирующегося при излучении «структурного» шума цилиндрической оболочкой, были проведены дополнительные измерения характеристик акустического поля, которое формируется при излучении «структурного» шума электродвигателем типа Sf 56-2В (мощность – 120 Вт, частота вращения ротора – 2800 1/мин). Габаритные размеры цилиндрического корпуса электродвигателя типа Sf 56-2В: диаметр – 0,15 м, длина – 0,2 м. Для проведения акустических измерений (с использованием метода АИ) электродвигатель был размещен в центре испытательного помещения с жесткими ограждающими конструкциями (в форме прямоугольного параллелепипеда). Габаритные размеры этого помещения 3,5 × 4,5 × 5,0 м.

Измерения проводились (с использованием метода АИ) на трех измерительных поверхностях (ИП) (в форме прямоугольного параллелепипеда: $MS1$, $MS2$, $MS3$) с габаритными размерами: 0,2 × 0,2 × 0,2 м ($MS1$); 0,5 × 0,5 × 0,5 м ($MS2$); 0,75 × 0,75 × 0,75 м ($MS3$).

Согласно результатам измерений значений критерияльного параметра (индекса F_2 «Давление – Интенсивность») в ближней зоне поля (в низкочастотном диапазоне: ниже 400 Гц) на всех трех ИП доминирует реактивная составляющая комплексного акустического поля. В то же время при проведении измерений в дальней зоне поля (в диапазоне средних частот выше 800 Гц) реактивная компонента интенсивности поля быстро спадает с расстоянием (по мере удаления от источника звука), поэтому на ИП (MS3) уже доминирует активная компонента комплексного акустического поля.

В низкочастотном диапазоне в частотном спектре комплексного поля выделяются тональные составляющие в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами 100 и 125 Гц (согласно результатам расчетов на этих частотах возбуждаются первые моды собственных колебаний испытательного помещения). Таким образом, в низкочастотном диапазоне в измерительном помещении формируются чисто реактивные поля стоячих звуковых волн.

Согласно результатам измерений, на ИП (MS1) и (MS2) в акустическом поле доминирует реактивная компонента комплексного поля (на первых собственных частотах: в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами 100 и 125 Гц). А при проведении измерений на ИП (MS3), преимущественно, могут быть определены уровни интенсивности активной компоненты поля (в то время, как уровни интенсивности реактивной компоненты поля на столь значительном расстоянии от источника звука существенно меньше уровней интенсивности активной компоненты поля).

На более низких частотах (ниже 80 Гц) в этом измерительном помещении не могут возбуждаться моды собственных колебаний объема помещения (вследствие небольших размеров помещения). Однако в этом диапазоне аномально низких частот в помещении возбуждаются чисто реактивные поля стоячих «неоднородных» акустических волн.

Анализ результатов измерений (на основе метода АИ), представленных в разделе 4.1, показывает, что в акустической камере (в которой корпус электродвигателя излучает структурный шум), помимо комплексного ЛАП формируются два чисто реактивных поля: поле стоячих акустических волн и поле стоячих «неоднородных» акустических волн. Аналогичным образом, на этапе пуска РН вследствие возбуждения изгибных колебаний корпусной конструкции ГО излучается структурный шум. При этом в щелевидной полости (между корпусами ГО и КА), помимо комплексного ЛАП формируется чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических

волн (на одной из первых собственных частот щелевидной полости). Как отмечено в разделе 4.1, скорость распространения энергии в поле «неоднородных» акустических волн значительно меньше, чем в поле активной компоненты (звуковых волн). Поэтому первые собственные частоты щелевидной полости (между корпусами ГО и КА) расположены в диапазоне аномально низких частот (ниже 50 Гц).

В соответствии с результатами измерений (с использованием метода АИ) акустических характеристик ЛАП, формирующегося в акустической камере вследствие излучения шума аэродинамического происхождения (при работе источника звука типа ОИШ-МВ-1), в низкочастотном диапазоне (ниже 400 Гц) уровни интенсивности реактивной компоненты ЛАП существенно превосходят уровни интенсивности активной компоненты этого поля (табл. 2). В то же время, скорость спадания уровней интенсивности реактивной компоненты ЛАП с расстоянием (по мере удаления от источника шума) значительно больше, чем скорость спадания (с расстоянием) уровней интенсивности активной компоненты ЛАП.

Анализ результатов измерений (приведенных в табл. 2) показывает, что появление в акустическом поле тональной составляющей (в третьоктавной полосе частот со среднегеометрической частотой 31,5 Гц) обусловлено формированием чисто реактивного поля стоячих акустических волн (вследствие суммирования волн, излучаемых источником звука типа ОИШ-МВ-1, с волнами, отраженными от ограждающей конструкции камеры). Причем в объеме камеры формируется два чисто реактивных поля: поле стоячих акустических волн и поле стоячих «неоднородных» акустических волн. Энергия поля звуковых пульсаций давления трансформируется в энергию поля стоячих акустических волн, а энергия поля псевдозвуковых пульсаций давления представлена в виде энергии чисто реактивного поля стоячих «неоднородных» акустических волн. Согласно результатам измерений в ЛАП в низкочастотном диапазоне (ниже 125 Гц) в ближней зоне локального поля доминирует чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн.

В разделе 4.2 представлены результаты измерений (в низкочастотном диапазоне, на основе метода АИ) характеристик комплексного акустического поля, которое формируется в акустической камере при работе источника звука типа ОИШ-МВ-1 (колеса радиального вентилятора с вперед загнутыми лопатками). Согласно результатам этих измерений, в ближней зоне комплексного акустического поля активная и реактивная компоненты этого поля формируются вследствие возбуждения, соответственно,

звуковых и псевдозвуковых (гидродинамических) пульсаций давления в турбулентном пограничном слое [15, 16, 24, 31]. Причем в низкочастотном диапазоне (в особенности, при $f \leq 100$ Гц) интенсивность псевдозвуковых пульсаций давления существенно превышает интенсивность звуковых пульсаций давления. Поэтому, согласно результатам измерений, проведенных в ближней зоне комплексного акустического поля, уровни интенсивности звука в реактивном акустическом поле выше уровней интенсивности звука в активном акустическом поле.

Причем энергия поля звуковых пульсаций давления трансформируется в энергию «вихревого» поля (то есть поля звуковых волн), которое формируется в дальней зоне акустического поля. В то же время энергия чисто реактивного поля псевдозвуковых пульсаций давления не может трансформироваться в энергию волнового поля, эта энергия сконцентрирована около поверхности лопатки и быстро затухает по мере удаления микрофона от источника псевдозвуковых пульсаций.

Таким образом, в гидродинамическом ближнем поле псевдозвуковых пульсаций давления энергия сконцентрирована в непосредственной близости от поверхности лопатки колеса, обтекаемой турбулентным потоком. Причем в гидродинамической ближней зоне поля воздушная среда (то есть турбулентный воздушный поток) практически утрачивает упругие свойства и ведет себя как несжимаемая среда. Поле псевдозвуковых пульсаций давления может быть классифицировано как поле «неоднородных» акустических волн, в котором колебательная энергия псевдозвуковых пульсаций давления переносится вдоль обтекаемой поверхностью лопатки со скоростью локальной конвекции вихрей в турбулентном потоке [31]. Для описания процесса формирования поля неоднородных акустических волн используются уравнения гидродинамики (в частности, уравнение Лапласа) вместо уравнения Гельмгольца. Поэтому в поле «неоднородных» акустических волн скорость переноса энергии значительно меньше скорости распространения звуковых волн в воздушной среде.

При работе источника звука типа ОИШ-МВ-1 формируется два поля пульсаций давления. Поле звуковых пульсаций давления возбуждается в результате вихреобразования на выходе из межлопаточных каналов колеса, а поле псевдозвуковых пульсаций давления формируется рядом с поверхностью лопатки колеса (в результате отрыва пограничного слоя от поверхности лопатки) [15, 16, 24, 31].

Таким образом, в результате экспериментальных исследований (проведенных в акустической камере и в измерительном помещении с жесткими ограждаю-

щими конструкциями) были определены низкочастотные характеристики акустических полей, которые формируются в акустической камере: при использовании источника звука, излучающего либо структурный шум, либо шум аэродинамического происхождения. В диапазоне аномально низких частот (не превышающих 100 Гц) в объеме камеры (или измерительного помещения) формируются: комплексное акустическое поле, а также чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн и реактивное поле стоячих акустических (звуковых волн). Причем интенсивность реактивного поля стоячих «неоднородных» акустических волн существенно выше, чем интенсивность реактивного поля стоячих звуковых волн.

В рамках программы исследований акустических характеристик ЛАП, формирующихся на этапе пуска РН в щелевидной полости, расположенной между корпусами ГО и КА, были проведены измерения (с использованием метода АИ) в низкочастотном диапазоне, в котором длина волны значительно превышает ширину щелевидной полости. На практике ширина щелевидной полости, расположенной между корпусами ГО и КА, не превышает 0,5 м. Поэтому на частотах ниже 100 Гц (когда длина волны звуковой волны в воздухе (λ_B) превышает 3,5 м) по ширине полости укладывается всего 0,15 λ_B .

В этом случае в объеме щелевидной полости не может сформироваться реактивное поле стоячих звуковых волн.

В то же время, в щелевидной полости может сформироваться чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн, поскольку скорость распространения «неоднородных» акустических волн (около поверхности корпусной конструкции ГО) в несколько раз меньше скорости распространения звуковых волн. При этом длина «неоднородной» акустической волны (λ_H^{Ak}) в несколько раз меньше длины звуковых волн.

В случае, когда ширина полости равна половине длины «неоднородной» акустической волны, в объеме полости формируется чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн. В чисто реактивном поле стоячих «неоднородных» акустических волн акустическая энергия не распространяется в среде (в объеме щелевидной полости), энергия поля распределена по объему, в соответствии с фазовой характеристикой поля.

При отражении акустической волны от ограждающих поверхностей щелевидной полости (то есть от корпусных конструкций КА и ГО) колебательная скорость равна нулю. Поэтому акустическая энергия не передается на корпусную конструкцию КА (усредненные значения уровней интенсивности и звука, в чисто реактивном поле равны 0).

При измерении уровней звукового давления в ЛАП, формирующемся в объеме щелевидной полости, с помощью микрофона может быть измерено распределение уровней звукового давления в объеме полости (в соответствии с фазовой характеристикой поля). В то же время, ЛАП в действительности не оказывает динамического воздействия на элементы КА (корпусную конструкцию, солнечные батареи, антенну), поскольку при отражении акустической волны от жесткой ограждающей поверхности колебательная скорость в волне равна нулю.

На самом деле, так называемый «эффект заполнения» не является каким-либо новым эффектом. Анализ результатов измерений, проведенных с использованием метода АИ, показывает, что появление в спектре ЛАП низкочастотных составляющих на anomalно низких частотах: (в особенности, ниже 50 Гц), по-видимому, обусловлено формированием в объеме полости чисто реактивного поля стоячих «неоднородных» акустических волн.

При измерении уровней звукового давления в низкочастотном диапазоне (на anomalно низких частотах: ниже 100 Гц) микрофон не способен различать акустические поля с принципиально различной физической природой [16, 24]. В то же время в узкой щелевидной полости (расположенной между корпусными конструкциями ГО и КА) на этапе пуска РН формируется комплексное акустическое поле со сложной структурой ЛАП, а также чисто реактивное поле стоячих звуковых волн и чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн.

Физические процессы, которыми обусловлено формирование ЛАП в щелевидной полости, рассмотрены в разделе «Введение». Изгибные колебания корпусной конструкции ГО возбуждаются в результате динамического воздействия, оказываемого на ГО (на этапе пуска РН). Причем акустическая энергия, которая генерируется при работе РД, передается на корпус ГО по трем каналам: в виде звуковых волн высокой интенсивности, в виде вибрации и в виде поля пульсаций давления, которое возбуждается около поверхности корпуса ГО в результате отрыва пограничного слоя при обтекании корпуса ГО сверхзвуковым потоком воздуха.

Изгибные колебания корпуса ГО сопровождаются излучением структурного шума, при этом в объеме щелевидной полости формируется комплексное ЛАП. В низкочастотном диапазоне в этом поле выделяются четыре компоненты: поле звуковых пульсаций давления; реактивное поле псевдозвуковых (или гидродинамических) пульсаций давления, а также чисто реактивное поле стоячих звуковых волн и чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн (на anomalно низких частотах).

Таким образом, согласно результатам экспериментальных исследований, возбуждение тональных составляющих в спектре ЛАП (на anomalно низких частотах) обусловлено формированием в объеме узкой щелевидной полости (расположенной между корпусами ГО и КА) чисто реактивного поля стоячих «неоднородных» акустических волн и чисто реактивного поля стоячих звуковых волн.

Энергия реактивной компоненты акустического поля сконцентрирована вблизи от поверхности вибрирующей корпусной конструкции ГО, в виде кинетической энергии присоединенной массы объема среды, прилегающего к конструкции. Эта реактивная компонента поля может быть представлена в виде поля псевдозвуковых (или гидродинамических) пульсаций давления (либо в виде поля «неоднородных» акустических волн [21, 31]).

Согласно [21], для описания неоднородной акустической волны используется решение уравнения Гельмгольца, в котором вещественный волновой вектор \vec{k} (в отличие от решения волнового уравнения, используемого для описания однородной плоской волны) заменен на комплексный волновой вектор: $\vec{\xi} + i\vec{a}$. Скорость распространения «неоднородной» акустической волны вычисляется с помощью выражения: $\gamma = \omega/\xi$.

Энергия реактивной компоненты комплексного акустического поля (то есть, чисто реактивного поля «неоднородных» акустических волн) сконцентрирована вблизи от поверхности корпуса ГО, в котором (на этапе пуска РН) возбуждаются изгибные колебания. Причем в низкочастотном диапазоне интенсивность реактивной компоненты комплексного акустического поля существенно превосходит интенсивность активной компоненты комплексного поля.

В то же время реактивная компонента поля очень быстро затухает (по экспоненциальному закону) по мере удаления от поверхности корпусной конструкции ГО (в дальней зоне акустического поля).

Поэтому в случае, когда акустические измерения проводятся в «пустом» отсеке ГО (в котором не размещена полезная нагрузка: в частности, КА), в объеме отсека ГО не может сформироваться чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн. Дело в том, что поле гидродинамических (псевдозвуковых) пульсаций давления формируется только в непосредственной близости от вибрирующей поверхности ГО (в виде присоединенной массы объема воздушной среды, прилегающей к поверхности конструкции). По мере удаления от поверхности корпуса ГО (то есть от источника структурного шума) «неоднородные» акустические волны, в отличие от активной компоненты

комплексного акустического поля, очень быстро затухают (по экспоненциальному закону). Быстрое затухание «неоднородных» акустических волн (или псевдозвуковых пульсаций давления) обусловлено реактивной природой этих волн.

Как отмечалось выше, «неоднородная» акустическая волна распространяется вдоль поверхности ГО и убывает по экспоненциальному закону при увеличении расстояния от поверхности ГО до точки наблюдения. Чем больше значение постоянной распространения (ξ), то есть чем меньше длина волны, тем интенсивней происходит спад уровней давления в волне (по мере удаления волны от поверхности ГО).

Таким образом, на больших расстояниях от поверхности ГО вклад «неоднородных» акустических волн в комплексное акустическое поле, формирующееся в объеме отсека ГО, незначителен. Энергия поля неоднородных акустических волн сконцентрирована вблизи от поверхности источника звука (то есть вибрирующей корпусной конструкции ГО), причем вблизи от поверхности ГО интенсивность поля «неоднородных» акустических волн существенно превышает интенсивность активной компоненты комплексного акустического поля.

Диаметр цилиндрической части ГО Atlas/Centaur равен 4,3 м. Поэтому в «пустом» отсеке ГО не может сформироваться чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн. Дело в том, что, вследствие быстрого затухания «неоднородной» акустической волны (по мере увеличения расстояния от поверхности ГО), «неоднородные» акустические волны практически полностью затухают в объеме отсека ГО. Поэтому в объеме «пустого» отсека ГО энергия поля «неоднородных» акустических волн сконцентрирована практически только около поверхности корпусной конструкции ГО (в которой на этапе пуска РН формируется поле изгибных волн). В объеме «пустого» отсека ГО формируется только поле «прямых» неоднородных акустических волн, а поле стоячих «неоднородных» акустических волн не может сформироваться в «пустом» отсеке ГО (поскольку вследствие очень быстрого затухания неоднородных волн в «пустом» отсеке ГО не может сформироваться поле отраженных неоднородных волн). Таким образом, в «пустом» отсеке ГО энергия поля «неоднородных» акустических волн практически полностью сконцентрирована только около вибрирующей поверхности корпуса ГО, а по мере удаления от этой поверхности энергия очень быстро затухает.

В соответствии с изложенным при формировании (на этапе пуска РН) поля «неоднородных» акустических волн в «пустом» отсеке ГО, вследствие очень

быстрого затухания реактивной компоненты комплексного акустического поля в объеме отсека ГО, энергия реактивного поля «неоднородных» акустических волн сконцентрирована практически только около поверхности корпусной конструкции ГО. Поэтому в «пустом» отсеке ГО не может сформироваться чисто реактивное поле стоячих неоднородных акустических волн и, вследствие этого, в широкополосном спектре шума не выделяются низкочастотные тональные составляющие (на собственных резонансных частотах объема «пустого» отсека ГО). Таким образом, в диапазоне низких частот (ниже 50 Гц) в объеме «пустого» отсека ГО в принципе не может сформироваться ни поле реактивной компоненты комплексного акустического поля, ни чисто реактивное поле стоячих звуковых волн, ни чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн.

На основании результатов теоретического анализа физических процессов, которыми обусловлено формирование ЛАП в объеме щелевидной полости (расположенной между корпусами ГО и КА) и результатов экспериментальных исследований локальных акустических полей, формирующихся в акустической камере (в результате излучения как «структурного» шума, так и аэродинамического шума), разработана отраслевая методика (для РКП). Эта методика предназначена для проведения корректных измерений низкочастотных характеристик ЛАП, формирующихся в отсеке ГО (на этапе пуска РН).

В разделах 2 и 3 представлен подробный анализ метрологических проблем, возникающих при проведении акустических измерений в низкочастотном диапазоне, то есть в случае, когда невозможно установить измерительный микрофон в дальней зоне акустического поля (вследствие ограниченных размеров измерительного помещения). Исходя из результатов этого анализа, разработана эксклюзивная методика проведения низкочастотных акустических измерений в ближней зоне акустического поля.

В соответствии с базовыми принципами акустической метрологии (на основе требований по [12]) для проведения корректных измерений уровней звукового давления в акустическом поле микрофон должен размещаться исключительно в дальней зоне акустического поля. В ближней зоне акустического поля волновые эффекты (интерференция и дифракция волн) оказывают весьма существенное влияние на результаты измерений, причем практически невозможно определить величину систематической погрешности измерений (обусловленной влиянием волновых эффектов).

Поэтому к принципиальным отличиям эксклюзивной методики акустических измерений в отсеке ГО от методик, применяемых отечественными и

зарубежными специалистами [4 – 7; 17, 18, 25, 26], следует отнести использование метода АИ для проведения измерений характеристик ЛАП в области низких и аномально низких частот.

При проведении акустических измерений в узкой щелевидной полости (то есть в условиях ЛАП, формирующегося в полости) измерительный микрофон был размещен в непосредственной близости от жестких ограждающих поверхностей. При этом нарушаются основные (базовые) метрологические требования стандарта [12], в соответствии с которыми микрофон должен размещаться только в дальней зоне акустического поля, а расстояние между микрофоном и ограждающими конструкциями камеры (в объеме которой проводятся измерения) составляет не менее 1 м.

Таким образом, при разработке отраслевой методики для проведения корректных низкочастотных акустических измерений в РКП может быть использована только эксклюзивная методика на основе метода АИ. В этом случае для проведения измерений используется двухмикрофонный зонд, с помощью которого измеряются энергетические характеристики акустического поля, поэтому с помощью такого зонда можно проводить интенсивметрические измерения в ближней зоне акустического поля.

На основании результатов измерений в двух точках акустического поля (при использовании зонда) вычисляются значения градиентов звукового давления и фазы, а затем помощью известных выражений (1) и (2) вычисляются значения активной и реактивной компоненты комплексного акустического поля. Таким образом, при использовании эксклюзивной методики (на основе метода АИ) можно проводить корректные акустические измерения в ближней зоне поля (с учетом влияния систематических погрешностей измерений).

При проведении измерений в области средних и высоких частот может быть использована стандартная методика (в соответствии с требованиями стандарта [12]). В этом случае все измерительные поверхности должны располагаться в дальней зоне акустического поля, а расстояние между микрофоном и ограждающими поверхностями помещения должно составлять не менее 1 м.

Таким образом, в ближней зоне акустического поля измерения могут проводиться только на основе метода АИ, поскольку интенсивность звука относится к энергетическим характеристикам акустического поля (в отличие от звукового давления, которое относится к волновым характеристикам поля). В соответствии с изложенным, только при использовании эксклюзивной методики, разработанной в

рамках данной программы измерений характеристик ЛАП (на основе метода АИ), можно провести корректные акустические измерения в ближней зоне акустического поля (в низкочастотном диапазоне, в особенности, в диапазоне аномально низких частот ниже 50 Гц).

На основании результатов экспериментальных исследований (представленных в разделах 4 и 5.2) установлено, что возбуждение тональных составляющих (на аномально низких частотах ниже 50 Гц) в спектре комплексного ЛАП обусловлено возбуждением в объеме узкой щелевидной полости (между корпусами ГО и КА) чисто реактивного поля стоячих «неоднородных» акустических волн. Поле стоячих «неоднородных» акустических волн возбуждается на первых собственных частотах полости, на которых возбуждаются моды первых собственных колебаний объема этой щелевидной полости. В то же время на границе с поверхностью корпусной конструкции КА в чисто реактивном поле стоячих «неоднородных» акустических волн колебательная скорость равна нулю, а усредненные значения уровней интенсивности в чисто реактивном поле стоячих «неоднородных» акустических волн равны нулю. Следовательно, это чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн в действительности не оказывает дополнительного динамического воздействия на конструктивные элементы КА (а также на солнечные батареи и антенну).

В [26] приведены рекомендации, в соответствии с которыми при разработке программы испытаний КА на стойкость к воздействию звуковых волн высокой интенсивности следует учитывать дополнительное воздействие на КА, якобы обусловленное «эффектом заполнения» щелевидной полости. То есть в случае, когда полость «заполнена» размещенным в ней КА, в объеме этой полости в низкочастотном диапазоне (ниже 50 Гц), согласно [25], в широкополосном спектре уровней звукового давления возбуждается дополнительная тональная составляющая (в третьоктавной полосе со среднегеометрической частотой 40 Гц). При проведении измерений в «пустом» отсеке ГО уровень этой тональной составляющей (с частотой 40 Гц) уменьшился на 5 дБ.

В действительности эти рекомендации не корректны, поскольку они основываются на некорректных результатах акустических измерений [25, 26], проведенных в отсеке ГО (в ходе измерений характеристик ЛАП, формирующегося между корпусом ГО Atlas/Centaur и корпусом макетного образца КА) в ближней зоне акустического поля на аномально низких частотах (ниже 50 Гц). Как отмечено выше, в этом случае принципиально недопустимо исполь-

зование методики измерений, в соответствии с которой при проведении акустических измерений в ближней зоне поля определяются уровни звукового давления (в соответствии с требованиями стандарта [12], установленными для проведения измерений в дальней зоне поля).

Как отмечалось выше, проведение измерений уровней звукового давления в ближней зоне акустического поля противоречит фундаментальным основам акустической метрологии и потому принципиально недопустимо.

Использование некорректной методики для проведения акустических измерений в низкочастотном диапазоне (на аномально низких частотах ниже 50 Гц) в щелевидной полости ограниченного размера, привело авторов работ [25, 26, 28] к ошибочным результатам при определении параметров динамического воздействия, которое оказывает на КА ЛАП, формирующееся в отсеке ГО (в щелевидной полости). Систематическая погрешность измерений обусловлена влиянием реактивной компоненты комплексного ЛАП на результаты измерений характеристики активной компоненты комплексного поля.

Для проведения корректных измерений низкочастотных характеристик акустических полей, формирующихся на этапе пуска РН в отсеке ГО (между корпусами ГО и КА) в рамках данной работы разработана эксклюзивная отраслевая методика (для РКП), основанная на использовании метода АИ. Эта методика использовалась для определения акустических характеристик источников структурного шума и источника аэродинамического шума.

Заключение

1. На этапе пуска РН наиболее значительное динамическое воздействие на конструктивные элементы КА оказывает динамическая нагрузка, которая обусловлена генерацией акустической энергии в процессе сгорания топлива в РД.

2. Основные механизмы генерации акустической энергии связаны с излучением шума аэродинамического происхождения при истечении газовой струи из сопла РН и при сверхзвуковом обтекании корпуса ГО воздушным потоком. Эта акустическая энергия передается на корпус ГО по трем каналам (рис. 1). А именно, в виде звуковых волн высокой интенсивности (которые генерируются при истечении газовой струи из сопла РД); в виде энергии турбулентного потока, обтекающего корпус ГО и в виде вибрации, которая передается на корпус ГО от сопла РД (по конструктивным элементам РН).

3. В низкочастотном диапазоне в результате динамического нагружения корпуса ГО акустическая энергия, которая генерируется при работе РД и передается на корпус ГО, трансформируется в энергию изгибных колебаний корпуса ГО. Затем энергия изгибных колебаний корпуса ГО (то есть вибрационная энергия) трансформируется в энергию комплексного акустического поля пристеночных пульсаций давления, которое формируется около поверхности корпуса ГО.

В низкочастотном диапазоне энергия комплексного акустического поля пристеночных звуковых пульсаций распределена между активной и реактивной компонентами поля, формирование которых обусловлено, соответственно, звуковыми и псевдозвуковыми пульсациями давления в турбулентном потоке.

4. Энергия поля звуковых пристеночных пульсаций давления трансформируется в энергию активной компоненты ЛАП. Активное поле звуковых волн формируется в объеме отсека ГО (между корпусами ГО и КА). Активная компонента комплексного ЛАП оказывает динамическое воздействие на наиболее уязвимые элементы КА (приборы, солнечные батареи, антенну).

5. Реактивная компонента комплексного поля представлена в виде поля псевдозвуковых (или гидродинамических) пульсаций давления. Энергия реактивной компоненты комплексного ЛАП сконцентрирована вблизи от поверхности вибрирующей корпусной конструкции ГО в виде кинетической энергии присоединенной массы объема среды, прилегающего к поверхности корпуса ГО.

6. В низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц) весь объем щелевидной полости (между корпусами ГО и КА) занимает ближняя зона комплексного ЛАП. В ближней зоне, в идеализированном случае, интенсивность активной компоненты комплексного ЛАП близка к 0, поскольку вследствие эффекта акустического «короткого замыкания» АКЗ, излучение соседних участков корпусной конструкции ГО (колеблющихся в противофазе) взаимно компенсируется (за исключением краевых участков конструкции ГО, излучение которых не компенсируется излучением соседних участков корпусной конструкции КА).

Однако, на практике при наличии на конструктивном элементе ГО любых «неоднородностей», участки конструкции (с такими «неоднородностями»), колебания которых не могут компенсироваться колебаниями смежных участков, излучают «некомпенсированные» звуковые волны (то есть, активную компоненту комплексного поля). Поэтому в действительности интенсивность активной компоненты ЛАП нельзя считать незначительной (пренебрежимо малой). В то же время в ближней зоне поля (на не-

большом расстоянии от корпуса ГО) интенсивность реактивной компоненты поля всегда значительно превосходит интенсивность активной компоненты поля.

7. Энергия псевдозвуковых пульсаций давления сконцентрирована в слое воздуха, который примыкает к поверхности корпусной конструкции ГО, причем энергия плавно перетекает вдоль этой корпусной поверхности ГО (в реактивном поле псевдозвуковых пульсаций давления). Следует отметить, что энергия реактивной компоненты поля быстро затухает по мере удаления точки наблюдения от вибрирующей поверхности корпуса ГО.

На этапе пуска РН при сверхзвуковом обтекании корпуса ГО воздушным потоком отрыв турбулентного пограничного слоя сопровождается формированием чисто реактивного поля псевдозвуковых (или гидродинамических) пульсаций давления.

В реактивном поле псевдозвуковых пульсаций давления (также применяется термин «поле неоднородных акустических волн»), которое формируется при отрыве турбулентного пограничного слоя от обтекаемой поверхностью корпуса ГО, энергия псевдозвуковых пульсаций давления переносится со скоростью локальной конвекции вихрей. Причем скорость конвекции вихрей значительно меньше скорости распространения звуковых волн в среде.

Помимо комплексного ЛАП в низкочастотном диапазоне в объеме отсека ГО на собственных частотах щелевидной полости (между корпусами ГО и КА), вследствие возбуждения в объеме этой полости форм собственных колебаний, формируется чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн. Поле стоячих волн формируется в объеме полости в результате суммирования «прямой» неоднородной акустической волны с волной, отраженной от конструктивных элементов КА.

8. Возможности для определения параметров пускового динамического нагружения элементов КА, обусловленного воздействием ЛАП, с использованием аналитических методов (в том числе с использованием компьютерного моделирования процессов, которыми обусловлено формирование ЛАП в отсеке ГО) ограничены. Поэтому в инженерной практике для определения параметров пусковой динамической нагрузки, оказывающей воздействие на КА, используются, преимущественно, экспериментальные методы.

9. В низкочастотном диапазоне (в особенности, ниже 100 Гц) проведение корректных измерений акустических характеристик комплексных ЛАП, которые формируются в щелевидной полости, сопряжено с достаточно сложными метрологическими проблемами.

При измерении акустических характеристик ЛАП, формирующихся в отсеке ГО, основные метрологические проблемы обусловлены комплексной природой этих полей. Для корректного измерения характеристик комплексного поля необходимо обеспечить возможность отдельного измерения характеристик активной и реактивной компоненты поля. В то же время в низкочастотном диапазоне при измерении уровней звукового давления невозможно определить по отдельности характеристики этих двух компонент. Поэтому в диапазоне низких частот f (в особенности, когда $f \leq 100$ Гц), в соответствии с международным стандартом [12] невозможно провести корректные измерения характеристик комплексных ЛАП (так как путем измерения уровней звукового давления невозможно определить по отдельности акустические характеристики активной и реактивной компоненты поля).

В соответствии со стандартом [12] для корректного определения акустических характеристик машин уровни звукового давления следует измерять на измерительной поверхности, расположенной в дальней зоне акустического поля машины. Однако в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц) во многих случаях, вследствие ограниченных габаритных размеров акустической камеры, размер ближней зоны акустического поля машины превышает размеры измерительной зоны камеры, в которой должны проводить измерения.

Кроме того, для расстояния ($r_{\text{изм}}$) между измерительной поверхностью и ближайшей ограждающей конструкцией измерительного помещения (акустической камеры), в соответствии с требованиями стандарта, должно выполняться соотношение: $(r_{\text{изм}}) \geq 1$ м.

10. Проведение акустических измерений в ближней зоне акустического поля прямо противоречит базовым принципам акустической метрологии, поскольку, в отличие от дальней зоны в ближней зоне формируется поле с весьма существенной неоднородностью структуры. Кроме того, на результаты акустических измерений (то есть измерений уровней звукового давления), которые проводятся в ближней зоне акустического поля, весьма существенное влияние оказывают систематические погрешности измерений. Систематические погрешности обусловлены, в частности, влиянием реактивной компоненты комплексного ЛАП на результаты измерений акустических характеристик активной компоненты комплексного ЛАП.

Согласно [16, 24], на низких частотах (ниже 100 Гц) мембрана микрофона не может отличить реактивную компоненту поля от активной компоненты. Поэтому при измерении уровней звукового давле-

ния в комплексном акустическом поле невозможно разделить акустические характеристики активной и реактивной компонент поля. На основании результатов таких измерений можно определить только суммарный уровень звукового давления в комплексном поле (L_p^{Σ}): $L_p^{\Sigma} = L_p^{Ac} + L_p^{Reac}$, где L_p^{Ac}, L_p^{Reac} – соответственно, уровни активной и реактивной компонент комплексного поля.

11. Исходя из результатов сравнительного анализа метрологических возможностей различных методов определения акустических характеристик машин (в низкочастотном диапазоне) в качестве альтернативного метода (по отношению к [12]) в рамках данной работы для проведения корректных акустических измерений в РКП был выбран метод АИ. При этом измерения проводятся в соответствии со стандартом [22].

12. С помощью метода АИ могут быть определены, по отдельности, акустические характеристики активной и реактивной компонент комплексного ЛАП, формирующегося, в частности, в отсеке ГО (в щелевидной полости между корпусами ГО и КА). Результаты интенсивметрических измерений активной компоненты ЛАП могут быть использованы в инженерной практике для определения величины пусковой динамической нагрузки на элементы КА, обусловленной воздействием локального ЛАП. Благодаря определению характеристики чисто активной компоненты ЛАП устраняется влияние на результаты низкочастотных измерений систематической погрешности, обусловленной влиянием чисто реактивной компоненты поля. В частности, энергия чисто реактивного поля псевдозвуковых пульсаций давления сконцентрирована около поверхности корпуса ГО и в низкочастотном диапазоне псевдозвуковые пульсации давления оказывают такое же динамическое воздействие на мембрану микрофона (размещенного в ближней зоне ЛАП), как и звуковые пульсации давления в активном звуковом поле.

13. В программу экспериментальных исследований характеристик ЛАП (при использовании метода АИ) были включены измерения в комплексном акустическом поле, которое формируется при излучении структурного акустического шума цилиндрической оболочкой. В качестве такого источника чисто структурного звука был использован серийный электродвигатель типа ДА 37-2К, при работе которого (в режиме холостого хода: без нагружения вала) возбуждались изгибные колебания корпусной конструкции. При этом моделировалось излучение структурного

(вибрационного) шума цилиндрической оболочкой (по аналогии с излучением структурного шума цилиндрической частью корпуса ГО).

14. Согласно результатам измерений, проведенных (при использовании метода АИ) в акустической камере АО «Корпорация «ВНИИЭМ», вследствие излучения структурного шума корпусом электродвигателя, формируется комплексное акустическое поле, а вследствие возбуждения первых мод собственных колебаний объема камеры в диапазоне низких частот формируются чисто реактивные поля стоячих звуковых волн и стоячих «неоднородных» акустических волн.

В низкочастотном диапазоне (ниже 200 Гц) в ближней зоне комплексного поля, формирующегося в объеме камеры в результате излучения структурного шума корпусом электродвигателя, уровни реактивной компоненты интенсивности звука существенно выше, чем уровни активной компоненты интенсивности звука. Далее, с ростом частоты колебаний, уровни реактивной компоненты интенсивности звука снижаются, в то же время, уровни активной компоненты интенсивности звука растут.

Кроме того, в низкочастотном диапазоне уровни интенсивности звука в реактивных полях стоячих волн (на собственных частотах камеры) существенно выше, чем уровень интенсивности реактивной составляющей в комплексном поле источника звука (шума).

15. Результаты экспериментальных исследований низкочастотных характеристик комплексного акустического поля, которое формируется в камере при изгибных колебаниях источника структурного шума (цилиндрического корпуса электродвигателя), и чисто реактивного поля стоячих «неоднородных» акустических волн представлены в разделах 4 и 5.2. На основе анализа этих экспериментальных результатов была установлена физическая природа явления, которое в техническом меморандуме [25] и в техническом стандарте [26] NASA называют «эффектом заполнения» или «фактором заполнения» [28].

16. Согласно результатам измерений уровней звукового давления, проведенным в щелевидной полости (между корпусами макетных конструкций ГО и КА) и представленным в работах [25, 26], это явление («эффект заполнения») заключается в том, что благодаря «заполнению» отсека ГО (при размещении в отсеке ГО аппарата КА) в широкополосном спектре акустического шума (уровней звукового давления) появляются дополнительные тональные составляющие на аномально низких частотах (обычно ниже 50 Гц). В то же время, при проведении измерений в «пустом» отсеке ГО уровень дополнительной тональной составляющей, согласно [25] уменьшается на 5 дБ. Авторы работ [25, 26] утверждают, что, якобы, эти тональные

составляющие поля оказывают дополнительное динамическое воздействие на КА, причем это дополнительное воздействие должно учитываться при проведении испытаний КА на стойкость к воздействию звуковых волн высокой интенсивности. То есть, при проведении испытаний КА на стенде (в частности, в реверберационной камере), параметры акустического поля (уровни интенсивности звука, уровни звукового давления), формирующегося в камере, должны соответствовать параметрам акустического поля, оказывающего воздействие на КА в натуральных условиях (на этапе реального пуска РН). В частности, согласно [25, 26], в широкополосном спектре акустического поля, формирующегося в объеме камеры на этапе стендовых испытаний КА, должны быть представлены дополнительные тональные составляющие, которые квалифицируются авторами работ [25, 26] как «эффект заполнения». Значения корректирующей поправки, учитывающей дополнительное динамическое воздействие на КА, которое обусловлено влиянием «эффекта заполнения», вычисляются с помощью расчетной методики, приведенной в работах [25, 26].

17. Однако, при проведении измерений уровней звукового давления в ближней зоне акустического поля [25] и в непосредственной близости от жестких поверхностей корпусных конструкций ГО и КА (когда $r_{\text{изм}}$ значительно меньше 1 м) авторами технического меморандума [25] были допущены грубые нарушения базовых принципов акустической метрологии, установленных международным стандартом [12]. Поэтому результаты этих измерений [25] некорректны, авторами не определены значения систематических погрешностей измерений, обусловленных грубыми нарушениями требований стандарта, устанавливающих методику проведения корректных акустических измерений. А именно, корректные измерения уровней звукового давления могут проводиться, исключительно, в дальней зоне акустического поля (в которой формируется активное акустическое поле сферических звуковых волн).

Поэтому результаты измерений, представленные в работах [25, 26, 28] должны быть признаны некорректными. В то же время, в соответствии с требованиями технических стандарта [26] и руководства [28] при разработке Программы стендовых испытаний КА (на стойкость к воздействию звуковых волн высокой интенсивности) параметры воздействия устанавливаются в соответствии с результатами измерений и расчетов, на основании расчетной методики, представленной в работах [25, 26, 28].

18. Однако, в действительности, в инженерной практике для проведения корректных низкочастот-

ных акустических измерений (в особенности, на anomalно низких частотах: ниже 100 Гц) может использоваться только эксклюзивная методика измерений (на основе применения метода АИ). Корректная методика низкочастотных акустических измерений в РКП должна основываться на использовании метода акустической интенсивности, поскольку именно интенсивность акустического поля определяется энергетическими характеристиками поля, которые не зависят от волновых эффектов в акустическом поле (интерференции и дифракции волн), оказывающих влияние на результаты измерений.

В соответствии с результатами экспериментальных исследований (при использовании метода АИ) акустических полей, формирующихся в акустической камере АО «Корпорация «ВНИИЭМ», изгибные колебания корпуса электродвигателя (используемого в качестве аналога корпусной конструкции ГО) сопровождаются излучением структурного шума. При этом в объеме акустической камеры (или в объеме щелевидной полости, расположенной между корпусами ГО и КА) формируется комплексное ЛАП. В низкочастотном диапазоне в этом поле выделяются четыре компоненты: поле звуковых пульсаций давления; реактивное поле псевдозвуковых (или гидродинамических) пульсаций давления, а также чисто реактивное поле стоячих звуковых волн и чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн (на anomalно низких частотах).

Таким образом, в диапазоне anomalно низких частот, согласно результатам экспериментальных исследований, проведенных в аттестованной камере, возбуждение тональных составляющих в спектре локального акустического поля (которое формируется в камере в результате излучения шума при изгибных колебаниях корпуса электродвигателя) обусловлено формированием в объеме камеры чисто реактивного поля стоячих «неоднородных» акустических волн и чисто реактивного поля стоячих звуковых волн.

Аналогичным образом, на этапе пуска РН, изгибные колебания корпусной конструкции ГО сопровождаются излучением структурного шума. При этом в объеме щелевидной полости, расположенной между корпусами ГО и КА, формируется комплексное ЛАП. В низкочастотном диапазоне в этом поле выделяются четыре компоненты: поле звуковых пульсаций давления; реактивное поле псевдозвуковых (или гидродинамических) пульсаций давления, а также чисто реактивное поле стоячих звуковых волн и чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн (на anomalно низких частотах).

19. Таким образом, согласно результатам экспериментальных исследований, возбуждение допол-

нительных тональных составляющих в спектре ЛАП (на аномально низких частотах) обусловлено формированием в объеме узкой щелевидной полости (расположенной между корпусами ГО и КА) чисто реактивного поля стоячих «неоднородных» акустических волн и чисто реактивного поля стоячих звуковых волн. В чисто реактивных полях тональные составляющие возбуждаются на первых собственных частотах объема щелевидной полости.

Следовательно, возбуждение тональных составляющих (на аномально низких частотах: ниже 50 Гц) в спектре комплексного ЛАП обусловлено возбуждением в объеме щелевидной полости (между корпусами ГО и КА) чисто реактивного поля стоячих «неоднородных» акустических волн. Поле стоячих «неоднородных» акустических волн возбуждается на первых собственных частотах полости, на которых возбуждаются моды первых собственных колебаний объема полости.

В то же время на границе с поверхностью корпусной конструкции КА в чисто реактивном поле стоячих «неоднородных» акустических волн колебательная скорость равна нулю, а усредненные значения уровней интенсивности в чисто реактивном поле стоячих «неоднородных» акустических волн равны нулю. Следовательно, это чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн, в действительности, не оказывает дополнительного динамического воздействия на конструктивные элементы КА (а также на солнечные батареи и антенну).

20. В технических стандарте и руководстве NASA [26, 28] приведены рекомендации, в соответствии с которыми при разработке программы испытаний КА на стойкость к воздействию звуковых волн высокой интенсивности, следует учитывать дополнительное воздействие на КА, якобы, обусловленное «эффектом заполнения» щелевидной полости. Согласно [25], дополнительное воздействие на КА могут оказывать тональные составляющие, которые возбуждаются в спектре широкополосного шума на первых собственных частотах объема щелевидной полости (между корпусами ГО и КА).

В действительности, эти рекомендации не корректны, поскольку они основываются на некорректных результатах акустических измерений [25, 26], проведенных в отсеке ГО, то есть в ближней зоне акустического поля, формирующегося между корпусом ГО Atlas/Centaur и корпусом макетного образца КА).

Проведение измерений уровней звукового давления в ближней зоне акустического поля противоречит фундаментальным основам акустической метрологии (требованиями стандарта [12]) и потому принципиально недопустимо.

Использование некорректной методики для проведения акустических измерений в низкочастотном

диапазоне (на аномально низких частотах ниже 50 Гц) в щелевидной полости ограниченного размера, привело авторов работ [25, 26, 28] к ошибочным результатам при определении параметров динамического воздействия, которое оказывает на КА ЛАП, формирующееся в отсеке ГО (в щелевидной полости). Систематическая погрешность измерений обусловлена влиянием реактивной компоненты комплексного ЛАП на результаты измерений характеристики активной компоненты комплексного поля.

Для проведения корректных измерений низкочастотных характеристик акустических полей, формирующихся на этапе пуска РН в отсеке ГО (между корпусами ГО и КА) в рамках данной работы разработана эксклюзивная отраслевая методика (для РКП), основанная на использовании метода АИ. Эта методика использовалась для определения акустических характеристик источников структурного шума и источника аэродинамического шума.

Выводы

1. На этапе пуска РН в щелевидной полости (между корпусами ГО и КА) формируется комплексное ЛАП, которое оказывает значительное динамическое воздействие на конструктивные элементы КА. Кроме того, в объеме щелевидной полости формируется чисто реактивное поле стоячих акустических волн, а также чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн.

2. Основные физические механизмы генерации акустической энергии на этапе пуска РН связаны с излучением шума аэродинамического происхождения при истечении газовой струи из сопла РД и при сверхзвуковом обтекании потоком корпуса ГО. Эта энергия трансформируется в энергию изгибных колебаний корпуса ГО (вибрационную энергию), а затем вибрационная энергия трансформируется в энергию комплексного акустического поля пристеночных пульсаций давления, которое формируется около поверхности ГО.

3. В низкочастотном диапазоне энергия комплексного акустического поля пристеночных звуковых пульсаций распределена между активной и реактивной компонентами поля, формирование которых обусловлено, соответственно, звуковыми и псевдозвуковыми пульсациями давления. Кроме того, в объеме щелевидной полости формируются два чисто реактивных поля: поле стоячих «неоднородных» акустических волн и поле стоячих звуковых волн.

4. Энергия поля звуковых пристеночных пульсаций давления трансформируется в энергию активной компоненты ЛАП. Активное поле звуковых волн формируется в объеме отсека ГО (между кор-

пусами ГО и КА). Активная компонента комплексного ЛАП оказывает динамическое воздействие на элементы КА.

5. Реактивная компонента комплексного поля представлена в виде поля псевдозвуковых («гидродинамических») пульсаций давления или «поля неоднородных акустических волн» [21]. Энергия реактивной компоненты комплексного ЛАП сконцентрирована вблизи от поверхности корпусной конструкции ГО в виде кинетической энергии присоединенной массы объема воздушной среды, прилегающего к поверхности ГО.

6. Помимо комплексного ЛАП в низкочастотном диапазоне в объеме отсека ГО на собственных частотах щелевидной полости возбуждаются формы собственных колебаний. При этом в объеме полости, в результате суммирования «прямой» неоднородной акустической волны с волной, отраженной от конструктивных элементов КА, формируется чисто реактивное поле стоячих «неоднородных» акустических волн.

7. Для корректного измерения характеристик комплексного ЛАП была разработана эксклюзивная методика измерений, с помощью которой можно определить (по отдельности) характеристики активной и реактивной компоненты ЛАП.

8. Исходя из результатов сравнительного анализа метрологических возможностей различных методов определения акустических характеристик машин (в диапазоне низких частот) в рамках данной работы для проведения корректных акустических измерений в РКП был выбран метод АИ. При проведении измерений интенсивностных характеристик комплексного поля, формирующегося в акустической камере, обеспечивается возможность раздельного определения характеристик как активной, так и реактивной компоненты комплексного акустического поля [19, 20]. Эти компоненты комплексного поля вычисляются (с помощью известных расчетных формул) на основании результатов измерения градиентов давления и фазы в комплексном акустическом поле.

9. Для проведения в РКП корректных измерений акустических характеристик ЛАП в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц), в соответствии с требованиями отраслевых нормативных документов и отраслевых стандартов, была разработана эксклюзивная отраслевая методика акустических измерений в РКП.

10. В соответствии с этой методикой для проведения акустических измерений следует использовать метод АИ. Только с помощью метода АИ можно определить, по отдельности, акустические характеристики активной и реактивной компонент ЛАП и,

таким образом, выделить, в качестве акустической характеристики ЛАП, только характеристику активной компоненты ЛАП. Кроме того, с помощью метода АИ, можно определить величину систематической погрешности измерений, которая обусловлена формированием в объеме полости реактивной компоненты комплексного ЛАП. Таким образом, с помощью эксклюзивной методики устраняется влияние на результаты измерений систематической погрешности измерений.

11. Согласно результатам экспериментальных исследований комплексного акустического поля, которое формируется в акустической камере при работе источников шума двух типов (источника структурного шума и источника аэродинамического шума), установлено, что в низкочастотном диапазоне уровни реактивной компоненты поля существенно превышают уровни активной компоненты поля. В то же время, в ближней зоне поля по мере удаления от поверхности ГО уровни реактивной компоненты поля спадают значительно быстрее, чем уровни активной компоненты поля.

12. Благодаря использованию метода АИ, в низкочастотном диапазоне с помощью эксклюзивной методики получены корректные результаты измерений при определении уровней активной и реактивной компоненты комплексного акустического поля, формирующегося в ближней зоне акустического поля. Следует подчеркнуть, что проведение корректных измерений в ближней зоне поля возможно только при использовании эксклюзивной методики (на основе метода АИ), поскольку интенсивность звука (в отличие от давления звука) является энергетической характеристикой акустического поля и волновые эффекты не оказывают влияние на результаты интенсивностных измерений. В то же время уровни звукового давления не могут быть измерены в ближней зоне поля, поскольку, в соответствии с требованиями стандарта [12], измерительные поверхности должны располагаться исключительно в дальней зоне поля.

13. На основании результатов теоретического анализа и экспериментальных исследований акустических характеристик источников структурного и аэродинамического шума для РКП разработана отраслевая эксклюзивная методика низкочастотных акустических измерений (на основе метода АИ), с помощью которой можно проводить корректные интенсивностные измерения в ближней зоне ЛАП и на небольшом расстоянии от ограждающей поверхности.

14. В то же время некоторые специалисты [4–6, 25, 26] для определения акустических характеристик источ-

ников звука используют некорректные методики, основанные на измерении уровней давления звука в ближней зоне ЛАП. При этом вследствие размещения измерительных поверхностей в ближней зоне ЛАП и в непосредственной близости от жестких ограждающих поверхностей, ограничивающих объем щелевидной полости, были нарушены базовые принципы акустической метрологии, сформулированные в международном стандарте [12].

15. На основании некорректной методики измерений были получены заведомо некорректные результаты измерений, включенные в технический меморандум [25]. На основании этих некорректных результатов измерений в технический стандарт NASA [26] была включена методика вычисления специальной поправки, с помощью которой должно учитываться влияние так называемого «эффекта заполнения» или «фактора заполнения» [26, 28] на эффективность динамического нагружения элементов КА. Согласно [25, 26, 28], «эффект заполнения» приводит к возбуждению (на этапе пуска РН) низкочастотных тональных составляющих в акустическом поле, которое формируется в объеме щелевидной полости.

16. В рамках данной работы с использованием методов физического моделирования процессов формирования комплексного ЛАП в отсеке ГО (на этапе пуска РН) были проведены экспериментальные исследования процесса формирования комплексного акустического поля источников структурного и аэродинамического шума. На основании анализа результатов корректных измерений характеристик активной и реактивной компоненты комплексного акустического поля в низкочастотном диапазоне (выполненных с использованием метода АИ) установлено, что появление низкочастотных тональных составляющих в спектре ЛАП обусловлено формированием в отсеке ГО чисто реактивных полей стоячих «неоднородных» акустических волн. Поскольку чисто реактивное поле не оказывает никакого динамического воздействия на КА, то «эффект заполнения» в действительности не оказывает влияния на величину пускового динамического нагружения элементов КА. Следовательно, «эффект заполнения» не должен учитываться в стандарте NASA [25, 26] при определении нормативных значений параметров динамического нагружения КА в рамках программы наземных стендовых испытаний КА.

17. На основании анализа результатов экспериментальных исследований локальных акустических полей (ограниченных ближней зоной акустического поля), полученных при использовании метода АИ, установлена природа «эффекта запол-

нения». Разработана физическая модель, с помощью которой описывается процесс возбуждения тональных составляющих на первых собственных частотах объема щелевидной полости. В качестве такой модели используется процесс формирования чисто реактивного поля стоячих «неоднородных» акустических волн.

Литература

1. О моделировании процессов формирования пусковых нагрузок, оказывающих динамическое воздействие на космический аппарат / М. Ю. Либерман // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2013. – Т. 136. – № 5. – С. 19 – 30.
2. Study on Numerical Vibro-acoustic Analysis of Spacecrafts / T. Takahashi, K. Murakami, Aoyama T. Takashi [et al.] // Proceedings of the 14th International Congress on Sound and Vibration (ICSV 14). – Cairns, Australia, 2007. – 8 p.
3. Noise and vibration of the spacecraft structures / J. P. Arenas, R. N. Margasahayam // Ingeniare Revista chilena de ingenieria. – 2006. – Vol. 14. – № 3. – P. 251 – 264.
4. Сравнительный анализ спектров нагружения элементов конструкций при их вибрационном возбуждении и пульсациях акустического давления / Ю. М. Липницкий, А. И. Лиходед, В. В. Сидоров // Космонавтика и ракетостроение. – 2007. – Вып. 2(47). – С. 84 – 93.
5. Экспериментальное определение акустических нагрузок при пусках РН «Стрела» и расчетное определение режимов экспериментальной отработки выводимых космических аппаратов / П. Я. Носатенко, А. В. Бобров, М. Т. Баранов [и др.] // Вестник Саратовского государственного аэрокосмического университета. – 2010. – № 2. – С. 112 – 122.
6. Investigation of Acoustic Fields for the Cassini Spacecraft: Reverberant Versus Launch Environment / W. O. Hughes, A. M. McNelis, H. Himelblau // NASA Technical Memorandum TM. – Cleveland, Ohio : Glenn Research Center, 2000. – 209387. – P. 1 – 15
7. Response Analysis of Payload Fairing Due to Acoustic Excitation / A. P. Cherian, G. George, C. Prabha // International Journal of Scientific & Technology Research. – 2015. – Vol. 4. – Iss. 11. – P. 302 – 305.
8. Space engineering. Spacecraft mechanical loads analysis handbook / ECSS [European Cooperation for Space Standardization]: ECSS-E-HB-32-26A. – Leiden, Netherlands, 2013.
9. Validation of Methods to Predict Vibration of a Panel in the Near Field of a Hot Supersonic Rocket Plume / P. G. Bremner, P. A. Blelloch, A. Hutchings [et al.] // Proceedings of 17th AIAA/CEAS Aero-acoustics Conference (32nd AIAA Aero-acoustics Conference). – Portland, Oregon, 2011. – 15 p.
10. On identifying the true sources of aerodynamic sound / M. E. Goldstein // Journal of Fluid Mech. – 2005. – Vol. 526. – P. 337 – 347.
11. Flow decomposition and aerodynamic sound generation / S. Sinayoko, A. Agarwal, Z. Hu // Journal of Fluid Mech. – 2011. – Vol. 668. – P. 335 – 350.
12. ГОСТ ISO 3745-2014 Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии источников

шума по звуковому давлению. Точные методы для заглушенных и полузаглушенных камер : издание официальное : утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии : введен 01.11.2015 / подготовлен Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем». – Москва : Стандартформ, 2015. – 55 с.

13. Morshed M. Investigation of External Acoustic Loading on a Launch Vehicle Fairing During Lift-off : Ph.D. Dissertation / M. Morshed ; The University of Adelaide. – Adelaide, Australia, 2008.

14. Никифоров А. С. Акустическое проектирование судовых конструкций : справочник / А. С. Никифоров. – Ленинград : Судостроение, 1990. – 200 с.

15. Авиационная акустика. В 2 частях. Часть 2. Шум в салонах пассажирских самолетов / Под ред. А. Г. Муни-на. – Москва : Машиностроение, 1986. – 264 с.

16. Ffowcs Williams J. F. Hydrodynamic noise / Williams J. F. Ffowcs. – London : Imperial College of Science and Technology, 1992.

17. Payload fill effect investigation of a large launch vehicle fairing / L. Zheng, Y. Chen, S. Xiang [et al.] // International conference «Inter-Noise 2016». – Hamburg, 2016. – P. 7590 – 7600.

18. Reducing acoustic loads on a spacecraft inside a rocket fairing / A. Igolkin, P. Popov, E. Shakhmatov // International conference «Inter-Noise 2019». – Madrid, Spain, 2019. – P. 1 – 10.

19. Acoustic intensity analysis : Distinguishing energy propagation and wave front propagation / J. A. Mann III, J. Tichy // J. Acoust. Soc. Am. – 1991. – Vol. 90. – P. 20 – 25.

20. Higher-order estimation of active and reactive acoustic intensity / J. S. Lawrence, K. L. Gee, T. B. Neilsen [et al.] // Proceedings of Meetings on Acoustics (Acoustics'17 Boston). – 2017. – Vol. 30, 055004. – 8 p.

21. Исакович М. А. Общая акустика / М. А. Исакович. – Москва : Наука, 1973. – 496 с.

22. ГОСТ 30457-97 (ИСО 9614-1-93) Акустика. Определение уровней звуковой мощности источников шума на основе интенсивности звука. Измерение в дискретных точках. Технический метод : издание официальное :

утвержден постановлением Государственного комитета Российской Федерации по стандартизации, метрологии и сертификации : введен впервые : дата введения 01.01.1999 / подготовлен Техническим комитетом по стандартизации. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1998. – 15 с.

23. Методические принципы метрологической аттестации заглушенных акустических камер, основанной на результатах интенсивметрических измерений / В. Я. Геча, М. Ю. Либерман, А. В. Шматков // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2018. – Т. 165. – № 4. – С. 20 – 45.

24. Noise source mechanisms / Williams J. Ffowcs // Modern methods in analytical acoustics : Lecture notes. – Springer, Berlin ; Heidelberg, New York, 1992.

25. NASA LeRC's acoustic fill effect test program and results / W. O. Hughes, M. E. McNelis, J. E. Manning // NASA Technical Memorandum TM-106688. – California, 1994. – P. 1 – 20.

26. Payload Vibroacoustic Test Criteria // NASA Technical Standard, NASA-STD-7001. – 1996. – 18 p.

27. Воздействие на космический аппарат пусковой динамической нагрузки, обусловленной формированием локальных акустических полей в отсеке обтекателя / М. Ю. Либерман // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. – Т. 151. – № 2. – С. 12 – 29.

28. Dynamic environmental criteria : NASA Technical Handbook, NASA-HDBK-7005. – 2001. – 231 p.

29. The Fill Factor, Fact or Fiction / T. Scharton // The 2005 Spacecraft & Launch Vehicle Dynamic Environments Workshop ; The Aerospace corporation. – El Segundo, SA, 2005. – P. 1 – 20.

30. Investigation of Spacecraft Vibration Subjected to Acoustic Sound Field of Fill Effect / N. Ozaw, Q. Shi, S. Ando [et al.] // Proceedings of 52nd AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. – Denver, Colorado, USA, 2011. – Vol. 8. – P. 5916 – 5926.

31. Смольяков А. В. Шум турбулентных потоков : монография / А. В. Смольяков ; ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. – Санкт-Петербург, 2005. – 312 с.

Поступила в редакцию 20.04.2020

*Владимир Яковлевич Геча, доктор технических наук, заместитель генерального директора, т. (495) 365-26-69.
Михаил Юдимович Либерман, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, т. (495) 366-21-10.
Александр Валентинович Шматков, начальник лаборатории, т. (495) 366-21-01.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

METROLOGICAL PROBLEMS IN ROCKET AND SPACE INDUSTRY RELATED TO MEASUREMENTS OF LOW-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF ACOUSTIC FIELDS HAVING A DYNAMIC IMPACT ON SPACECRAFT AT THE LIFT-OFF STAGE

V. Ia. Gecha, M. Iu. Liberman, A. V. Shmatkov

To experimentally determine the acoustic loads affecting the structural elements of a spacecraft (at the lift-off stage), the measurements are performed in a narrow slot-shaped gap (between the payload fairing body and spacecraft body). Metrological problems arising in the rocket and space industry during low-frequency acoustic measurements in the near acoustic field zone are caused by application of incorrect industrial

methods. The measurements of sound pressure levels in the near-field zone (and in close proximity to the payload fairing and spacecraft body structures) contradict the basic principles of the acoustic metrology. The sound pressure levels should be measured only in the far-field zone. In order to perform correct acoustic measurements (taking into account specific industrial requirements) an exclusive measurement procedure has been developed on the basis of acoustic intensimetry method. According to the results of theoretical analysis and experimental research with the help of the exclusive industrial measurement procedure, the acoustic characteristics of the active and reactive components of a local complex acoustic field and totally reactive fields of standing sound waves and standing 'non-homogenous' acoustic waves can be determined. Based on the analysis of the results of experimental studies of local acoustic fields (limited by the near acoustic field zone) obtained with the use of the acoustic intensimetry method, the physical nature of the 'fill effect' has been determined.

Key words: acoustic intensimetry method, active and reactive components of a complex acoustic field, active and reactive components of sound intensity, sound and pseudosound pressure oscillation, 'non-homogenous' sound waves, reactive field of standing 'non-homogenous' acoustic waves, systematic measurement errors, near and far acoustic field zones, 'fill effect'.

References

1. Liberman M. Iu. About simulation of formation of the lift-off loads having a dynamic impact on a spacecraft // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – M.: 'VNIEM Corporation' JSC, 2013. – Vol. 136. – No. 5. – Pp. 19 – 30.
2. Study on Numerical Vibro-acoustic Analysis of Spacecrafts / T. Takahashi, K. Murakami, Aoyama T. Takashi [et al.] // Proceedings of the 14th International Congress on Sound and Vibration (ICSV 14). – Cairns, Australia, 2007. – 8 p.
3. Noise and vibration of the spacecraft structures / J. P. Arenas, R. N. Margasahayam // Ingeniare Revista chilena de ingenieria. – 2006. – Vol. 14. – No. 3. – P. 251 – 264.
4. Comparative analysis of structural elements load spectra in case of their vibratory excitation and acoustic pressure oscillation / Iu. M. Lipnitskii, A. I. Likhoded, V. V. Sidorov // Cosmonautics and rocket engineering. – 2007. – Issue 2(47). – Pp. 84 – 93.
5. Experimental determination of acoustic loads at launching of Strela launch vehicle and calculation of the modes of experimental testing of the carried spacecraft / P. Ia. Nosatenko, A. V. Bobrov, M. T. Baranov [et al.] // Bulletin of Samara State Aerospace University. – 2010. – No. 2. – Pp. 112 – 122.
6. Investigation of Acoustic Fields for the Cassini Spacecraft: Reverberant Versus Launch Environment / W.O. Hughes, A. M. McNelis, H. Himelblau // NASA Technical Memorandum TM. – Cleveland, Ohio : Glenn Research Center, 2000. – 209387. – Pp. 1 – 15
7. Response Analysis of Payload Fairing Due to Acoustic Excitation / A. P. Cherian, G. George, C. Prabha // International Journal of Scientific & Technology Research. – 2015. – Vol. 4. – Iss. 11. – Pp. 302 – 305.
8. Space engineering. Spacecraft mechanical loads analysis handbook / ECSS [European Cooperation for Space Standardization]: ECSS-E-HB-32-26A. – Leiden, Netherlands, 2013.
9. Validation of Methods to Predict Vibration of a Panel in the Near Field of a Hot Supersonic Rocket Plume / P. G. Bremner, P. A. Blelloch, A. Hutchings [et al.] // Proceedings of 17th AIAA/CEAS Aero-acoustics Conference (32nd AIAA Aero-acoustics Conference). – Portland, Oregon, 2011. – 15 p.
10. On identifying the true sources of aerodynamic sound / M. E. Goldstein // Journal of Fluid Mech. – 2005. – Vol. 526. – Pp. 337 – 347.
11. Flow decomposition and aerodynamic sound generation / S. Sinayoko, A. Agarwal, Z. Hu // Journal of Fluid Mech. – 2011. – Vol. 668. – Pp. 335 – 350.
12. GOST ISO 3745-2014 Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Precision methods for anechoic rooms and hemi-anechoic rooms : official edition : approved by the order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology : introd. 01.11.2015 / prepared by JSC 'Research Center for Monitoring and Diagnostics of Technical Systems'. – Moscow : Standartinform, 2015. – 55 p.
13. Morshed M. Investigation of External Acoustic Loading on a Launch Vehicle Fairing During Lift-off : Ph.D. Dissertation / M. Morshed ; The University of Adelaide. – Adelaide, Australia, 2008.
14. Nikiforov A. S. Acoustic design of marine structures. Handbook. – L.: Shipbuilding, 1990. – 200 p.
15. Aviation acoustics. In two parts. Part 2. Passenger aircraft cabin noise / Edited by A. G. Munin // M.: Machine building, 1986. – 264 p.
16. Ffowcs Williams J. F. Hydrodynamic noise / Williams J. F. Ffowcs. – London : Imperial College of Science and Technology, 1992.
17. Payload fill effect investigation of a large launch vehicle fairing / L. Zheng, Y. Chen, S. Xiang [et al.] // International conference «Inter-Noise 2016». – Hamburg, 2016. – Pp. 7590 – 7600.
18. Reducing acoustic loads on a spacecraft inside a rocket fairing / A. Igolkin, P. Popov, E. Shakhmatov // International conference «Inter-Noise 2019». – Madrid, Spain, 2019. – Pp. 1 – 10.
19. Acoustic intensity analysis : Distinguishing energy propagation and wave front propagation / J. A. Mann III, J. Tichy // J. Acoust. Soc. Am. – 1991. – Vol. 90. – Pp. 20 – 25.
20. Higher-order estimation of active and reactive acoustic intensity / J. S. Lawrence, K. L. Gee, T. B. Neilsen [et al.] // Proceedings of Meetings on Acoustics (Acoustics'17 Boston). – 2017. – Vol. 30, 055004. – 8 p.
21. Isakovich M.A. General acoustics. – M.: Nauka, 1973 – 496 p.
22. 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 : official edition : approved by the resolution of the State

- Committee of the Russian Federation for Standardization, Metrology and Certification : first edition : introd. 01.01.1999 / prepared by the Technical Committee for Standardization. – Moscow : IPC Standards Publishing House, 1998. – 15 p.
23. Methodological principles of metrological certification of anechoic acoustic chambers based on the results of intensimetric measurements / V. Ia. Gecha, M. Iu. Liberman, A. V. Shmatkov // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow : ‘VNIIEM Corporation’ JC, 2018. – Vol. 165. – No. 4. – Pp. 20 – 45.
24. Noise source mechanisms / Williams J. Ffowcs // Modern methods in analytica acoustics : Lecture notes. – Springer, Berlin ; Heidelberg, New York , 1992.
25. NASA LeRC’s acoustic fill effect test program and results / W. O. Hughes, M. E. McNelis, J. E. Manning // NASA Technical Memorandum TM-106688. – California, 1994. – Pp. 1 – 20.
26. Payload Vibroacoustic Test Criteria // NASA Technical Standard, NASA-STD-7001. – 1996. – 18 p.
27. 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. VNIIEM Proceedings. – M.: ‘VNIIEM Corporation’ JC. 2016. – Vol. 151. – No. 2. – Pp. 12 – 29.
28. Dynamic environmental criteria : NASA Technical Handbook, NASA-HDBK-7005. – 2001. – 231 p.
29. The Fill Factor, Fact or Fiction / T. Scharton // The 2005 Spacecraft & Launch Vehicle Dynamic Environments Workshop ; The Aerospace corporation. – EI Segundo, SA, 2005. – Pp. 1 – 20.
30. Investigation of Spacecraft Vibration Subjected to Acoustic Sound Field of Fill Effect / N. Ozaw, Q. Shi, S. Ando [et al.] // Proceedings of 52nd AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. – Denver, Colorado, USA, 2011. – Vol. 8. – Pp. 5916 – 5926.
31. Smoliakov A. V. Noise of turbulent flows: monograph / St. Petersburg : Central Research Institute named after academician A. N. Krylov, 2005. – 312 p.

*Vladimir Iakovlevich Gecha, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.),
Deputy Director General, tel.: (495) 365-26-69.*

*Mikhail Iudimovich Liberman, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.),
Senior Researcher, tel.: +7 (495) 366-21-10.*

*Aleksandr Valentinovich Shmatkov, Head of Laboratory, tel.: +7 (495) 366-21-01.
(JC «VNIIEM Corporation»).*