

ВОЗДЕЙСТВИЕ НА КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ ПУСКОВОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ, ОБУСЛОВЛЕННОЙ ФОРМИРОВАНИЕМ ЛОКАЛЬНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ОТСЕКЕ ОБТЕКАТЕЛЯ

М.Ю. Либерман

Представлены результаты анализа процесса формирования локальных акустических полей в объеме отсека головного обтекателя (ГО) ракеты-носителя (РН) в результате воздействия на корпус ГО пусковой динамической нагрузки аэроакустического типа. Установлено, что в области низких частот в объеме кольцевой щелевидной полости, расположенной между корпусами ГО и космического аппарата (КА), формируется поле неоднородных акустических волн (пульсаций давления). Энергия неоднородных (псевдозвуковых) акустических волн сконцентрирована около внутренней поверхности корпуса ГО в гидродинамической ближней зоне локального акустического поля. Неоднородные акустические волны быстро затухают при удалении от поверхности корпуса ГО и потому не оказывают динамического воздействия на корпус КА. Установлено, что «эффект заполнения» также не оказывает никакого влияния на интенсивность динамического нагружения корпуса КА. Этот эффект обусловлен увеличением плотности акустической энергии в объеме щелевидной полости (при размещении КА в отсеке ГО). В области низких частот локальное акустическое поле формируется в щелевидной полости, вследствие интерференции неоднородных акустических волн и структурных волн, которые возбуждаются в корпусе ГО. Энергия локального акустического интерференционного поля сконцентрирована около внутренней поверхности корпуса ГО, это поле не оказывает динамического воздействия на корпус КА.

Ключевые слова: локальное акустическое поле; неоднородные акустические волны; псевдозвуковые волны; «эффект заполнения»; динамическая нагрузка аэроакустического типа; отсек головного обтекателя; космический аппарат.

Введение

Как известно [1, 2], на этапе пуска ракеты-носителя (РН) на корпус её головного обтекателя (ГО) оказывают динамическое воздействие нагрузки аэроакустического типа, обусловленные генерацией акустической и вибрационной энергии при истечении газовой струи из сопла ракетного двигателя (РД) и при обтекании головного обтекателя РН воздушным потоком.

В частности, звуковые волны высокой интенсивности (мощность акустического излучения на этапе пуска достигает 10^4 кВт), которые генерируются при прохождении газовой струи через сопло РД (вследствие вихреобразования на выходе из сопла, обусловленного отрывом пограничного слоя от поверхности сопла), отражаются от пусковой площадки и пусковой установки. Отражённые звуковые волны оказывают динамическое воздействие на корпусную конструкцию ГО. Кроме того, на этапе пуска РН, когда её скорость достигает сверхзвуковых значений, при обтекании корпуса РН воздушным потоком отрыв пограничного слоя от внешней поверхности ГО приводит к формированию поля пульсаций давления около внешней корпусной поверхности ГО.

В результате динамического воздействия на ГО, обусловленного пусковой нагрузкой аэроакустического типа, возбуждаются изгибные упругие колебания корпусной конструкции ГО. Вибрирующая корпусная конструкция излучает «структурный» («вибрационный») шум, при этом в объеме отсека ГО формируется акустическое поле. Это акустическое поле оказывает динамическое воздействие на

корпус космического аппарата (КА), размещённого в отсеке ГО, и, в частности, на приборный отсек КА, в котором установлена измерительная аппаратура, а также на лёгкие навесные элементы КА (антенны и солнечные батареи).

Для прогнозирования величины пусковой динамической нагрузки аэроакустического типа, оказывающей воздействие на КА, необходимо определить параметры акустического поля, формирующегося в отсеке ГО вследствие трансформации энергии изгибных колебаний корпусной конструкции в энергию акустических полей, формирующихся в объеме отсека ГО. Для моделирования процесса формирования акустического поля в отсеке ГО в качестве модели корпусной конструкции ГО используют пустотелую оболочку, состоящую из двух оболочек: конической и цилиндрической.

Эта модель используется для анализа процесса формирования локальных акустических полей: в полости, ограниченной коническим корпусным элементом ГО, и в полости щелевидной формы, ограниченной цилиндрическим корпусным элементом ГО и корпусным элементом КА.

Анализ процесса формирования локальных акустических полей в общем случае основывается на использовании неоднородного волнового уравнения [3], с помощью которого вычисляются уровни звукового давления в объеме оболочки (отсека ГО). Для решения этого неоднородного уравнения обычно используются методы компьютерного моделирования акустических полей. В соответствии с принятой моделью, в этом случае возбуждаются, в частности, связанные структурные и акустические

моды, соответственно, в самой оболочке и в ограниченном ею объёме.

Для прогнозирования параметров динамического воздействия локальных акустических полей на корпус КА весь свободный объём отсека ГО подразделяется на две зоны: зону D и зону L . Зона D расположена в верхней части отсека и ограничена коническим элементом корпусной конструкции ГО, а зона L расположена в цилиндрической части отсека ГО (под зоной L в отсеке ГО расположены элементы крепления КА). Зона L ограничена корпусными конструкциями ГО и КА, эта зона имеет форму кольцевой щелевидной полости.

Анализ процессов, которыми обусловлено формирование акустических полей в объёме отсека ГО показывает, что и форма этих двух полостей (обозначенных как зона D и зона L) и их свободный объём весьма существенно отличаются друг от друга. Вследствие этих различий, в зонах D и L условия формирования акустических полей существенно различны (особенно в области низких и средних частот).

В зоне D в области средних и высоких частот в результате многократных отражений звуковых волн, которые излучаются при изгибных колебаниях конической части корпуса ГО, от ограждающих поверхностей корпусной конструкции формируется диффузное либо квазидиффузное акустическое поле. Это поле оказывает динамическое воздействие, преимущественно, на верхнюю часть корпуса КА.

В области низких частот поле становится неоднородным, поскольку длины звуковых волн превышают габаритные размеры корпуса ГО, структура поля зависит от соотношения между габаритными размерами отсека и длиной звуковых волн, а также от конструктивных особенностей корпусов ГО и КА.

В зоне L (в кольцевой щелевидной полости, расположенной между корпусами ГО и КА) формируется локальное акустическое поле со сложной неоднородной структурой. Причём, согласно результатам экспериментальных исследований [4, 5], структура и параметры акустического поля весьма существенным образом зависят от величины произведения: fH_{Gap} , где f – частота упругих колебаний; H_{Gap} – ширина щелевидной полости (зазора) между корпусами.

Следует отметить, что в случаях, когда корпус КА имеет сложную форму, и, вследствие этого, расстояние H_{Gap} между корпусами ГО и КА раз-

лично для разных участков корпуса КА, зону L следует дополнительно подразделить на зоны с постоянной шириной щели H_{Gap} [6].

Динамическое воздействие на корпус КА оказывают локальные акустические поля, формирующиеся в щелевидной полости между корпусами, а также вибрации, которые генерируются в двигательном отсеке РН и передаются на корпус КА по конструктивным элементам РН (через крепёжные элементы, с помощью которых КА закреплён в отсеке ГО).

Исследование локальных акустических полей является наиболее важной и актуальной задачей с точки зрения прогнозирования величины динамического нагружения КА на этапе пуска РН, поскольку пусковая нагрузка аэроакустического типа оказывает динамическое воздействие на электронные компоненты приборов, размещённых в приборном отсеке КА.

Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований акустических полей, формирующихся в отсеке ГО

Формирование локальных акустических полей в конусной части отсека ГО и в щелевидной полости между корпусами ГО и КА (на этапе пуска РН) обусловлено возбуждением структурных мод изгибных собственных колебаний в корпусной конструкции ГО. При изгибных колебаниях корпуса ГО излучаются звуковые волны, которые называют «структурным» (или «вибрационным») шумом. Возбуждение изгибных колебаний корпусной конструкции ГО обусловлено воздействием звуковых волн высокой интенсивности, излучаемых при истечении газовой струи из сопла РД.

Кроме того, вследствие отрыва пограничного слоя от поверхности ГО, на этапе пуска (когда скорость полёта РН достигает сверхзвуковых значений) около внешней поверхности корпуса ГО формируется поле пульсаций давления. Пульсации давления также оказывают динамическое воздействие на корпус ГО, в результате этого воздействия возбуждаются колебания (вибрации) корпусной конструкции ГО.

Уровни акустического воздействия непосредственно на испытываемое изделие (КА) зависят от эффективности передачи акустической энергии (генерация которой обусловлена работой РД) в отсек ГО. В результате воздействия звуковых волн и поля пульсаций давления (формирующегося около внешней поверхности корпуса ГО) на корпусную конструкцию ГО, возбуждаются собственные

структурные моды этой корпусной конструкции, а также акустические моды собственных колебаний объёма отсека ГО.

Акустическая энергия упругих волн и пульсаций давления, оказывающих динамическое воздействие на корпус ГО, распределяется преимущественно между этими собственными модами. Прогнозирование отклика корпусной конструкции ГО на воздействие акустической нагрузки основывается на использовании методов модального анализа (в низкочастотной области) и статистико-энергетического анализа (СЭА) в области средних и высоких частот. В качестве структурной динамической модели отклика корпуса ГО на акустическое воздействие в общем случае используется известное уравнение движения корпусных элементов ГО:

$$M[d^2X(t)/dt^2] + C[dX(t)/dt] + KX(t) = F(t), \quad (1)$$

где M, C, K – соответственно, матрицы массы, потерь энергии и жёсткости корпусного элемента ГО; $X(t)$ – вектор смещения корпусных элементов ГО; $F(t)$ – сила, действующая на корпус ГО. Решение таких уравнений движения для корпусной конструкции ГО и для его внутреннего объёма позволяет определить, соответственно, структурные и объёмные (акустические) моды собственных колебаний ГО.

Найти аналитическое решение для уравнения (1) не удаётся. Поэтому для решения уравнения (1) в области низких частот используются методы компьютерного моделирования, при этом для построения модели ГО используются методы конечных и граничных элементов (МКЭ и МГЭ) [7].

В области средних и высоких частот для прогнозирования уровней звукового давления в объёме ГО используется метод СЭА. При этом система (отсек ГО) разбивается на связанные между собой подсистемы (в которых энергия распределяется между модами собственных колебаний) и записывается уравнение баланса акустической энергии между подсистемами:

$$W_i^{in} = W_i^{absorb} + \sum_j W_{i,j}^{trans}, \quad (2)$$

где $\sum_j W_{i,j}^{trans}$ – усреднённое значение энергии, передающееся на j -ю подсистему; W_i^{in} ; W_i^{absorb} –

соответственно, усреднённые по времени значения энергии, поступающей в i -ю подсистему и потерь энергии в этой подсистеме.

В качестве подсистем можно рассматривать [7, 8]: объём ГО; корпус ГО (в котором возбуждаются изгибные моды колебаний); пространство вокруг ГО. Непосредственно на КА передаётся энергия акустического поля, которое возбуждается в объёме отсека ГО. Кроме того, на корпус КА по конструктивным элементам РН передаётся вибрационная энергия, которая возбуждается в корпусной конструкции ГО.

Поскольку возможности методов компьютерного моделирования ограничены, для прогнозирования динамического нагружения корпуса КА (при воздействии акустической нагрузки) результаты теоретического анализа и компьютерных расчётов используются только в сочетании с результатами экспериментальных исследований (как стендовых, так и натуральных).

Согласно результатам экспериментальных исследований [4, 5], проведённых в натуральных условиях и на стендах (с использованием макетных образцов ГО и КА), в частотном спектре локальных акустических полей наиболее интенсивные компоненты возбуждаются в низкочастотной области (обычно ниже 400 Гц).

Акустические измерения [4, 5] были проведены, в частности, в локальном акустическом поле, формирующемся в щелевидной полости между корпусами ГО и КА (т. е. в зоне L). В результате измерений установлено, что в низкочастотной области уровни звукового давления в полости существенно выше, чем в свободном объёме отсека ГО (когда отсек ГО пуст). Причём в частотном спектре уровней звукового давления, измеренном в щелевидной полости, выделяются низкочастотные максимумы в диапазоне частот ниже 100 Гц (в частности, в полосе частот 30 – 60 Гц).

Этот эффект был исследован как экспериментально, так и с помощью методов компьютерного моделирования, его назвали «эффектом заполнения» («Fill Effect» (FEF)). В документах NASA [4, 7] приведена оценочная методика расчёта величины поправки, с помощью которой учитывается влияние FEF на уровни звукового давления в щелевидной полости между корпусами ГО и КА.

Эту поправку называют «фактором (коэффициентом) заполнения» («Fill Factor» (FF)). Для вычисления величины FF используется следующее выражение [4, 7]:

$$FF = 10 \lg \left[(1 + c_0 / 2H_{Gap} f) / \{1 + [V_{filled} / V_{empty}] (c_0 / 2H_{Gap} f)\} \right], \quad (3)$$

где V_{filled} ; V_{empty} – соответственно, свободный объём отсека ГО в случае, когда он «заполнен» размещённым в нём КА, и свободный объём пустого отсека ГО; c_0 – скорость распространения звуковых волн в воздухе.

Это выражение получено с помощью расчётной модели, которая основывается на использовании «гибридного» метода СЭА [4]. В отличие от традиционного метода СЭА, который используется для расчётов в области средних и высоких частот, «гибридный» метод СЭА применяют и в области низких частот. Однако, как отмечено в работе [7], в области низких частот (ниже 100 Гц) погрешность расчетов, выполненных с помощью выражения (3), существенно возрастает. Исходя из результатов экспериментальных исследований в формулу (3) ввели корректирующую поправку Φ_1 , которая вычисляется с помощью эмпирического выражения [4]: $\Phi_1 = c_0 / 2H_{Gap} f$.

Согласно [4] «заполнение» отсека ГО (при размещении в нём КА) не оказывает существенного влияния на акустическое поле в зоне D (в конусной части объёма ГО). Исследования вибрационных характеристик корпусных конструкций ГО и КА не проводились в рамках данной программы [4].

Анализ литературных источников [4 – 10] показывает, что исследования эффекта FEF с использованием реальных макетов отсека ГО и корпуса КА [4] проводились только в Научно-исследовательском центре имени Льюиса (США) [NASA «Lewis Research Center» («LeRC»)].

В работе [9] рассмотрена расчётная модель, в соответствии с которой эффект FEF обусловлен формированием поля стоячих звуковых волн (в щелевидном пространстве между внутренней поверхностью корпуса ГО и поверхностью солнечной батареи либо поверхностью корпуса КА) и поля структурных стоячих волн (в корпусной конструкции).

В соответствии с этой моделью [9] эффект FEF обусловлен возбуждением и взаимодействием в отсеке ГО связанных собственных мод колебаний (акустических и структурных). Причём уровни звукового давления повышаются, преимущественно, в низкочастотной области (20 – 200 Гц), вслед-

ствие формирования в щелевидной полости поля стоячих волн.

Поле стоячих волн, согласно [9], формируется в результате интерференции звуковых волн, излучаемых в щелевидную полость вибрирующей корпусной конструкцией ГО («структурный» звук), со структурными волнами, которые возбуждаются в корпусных конструкциях КА или ГО. Причём в работе [9] представлены только результаты сравнения расчётных моделей акустических и вибрационных полей, которые формируются в полости и в корпусной конструкции отсека ГО. Экспериментальные исследования авторами работы [9] не проводились.

В работе [10] рассмотрена модель, в соответствии с которой повышение уровня звукового давления в отсеке ГО (при «заполнении» отсека ГО, размещённым в нём КА) обусловлено резонансными явлениями в объёме ГО.

При этом в качестве модели «заполненного» отсека ГО предложено использовать резонатор Гельмгольца [10].

Анализ публикаций [4 – 10], посвящённых исследованиям эффекта FEF, показывает, что в этих работах сформулированы принципиально различные гипотезы относительно возможной физической природы эффекта FEF. По вопросу о возможном воздействии дополнительной динамической нагрузки, обусловленной эффектом FEF, на корпусную конструкцию КА, авторы этих работ также придерживаются различных точек зрения.

Согласно результатам расчётов (основанных на использовании метода СЭА) [8], вследствие эффекта FEF интенсивность динамического воздействия на корпус КА не должна повышаться (т. е. не должны повышаться уровни виброскорости на корпусной конструкции КА).

Однако в документах NASA [4, 7] предписывается при проведении испытаний КА на стойкость к воздействию акустических нагрузок учитывать влияние FEF, а именно, к нормативному значению уровня звукового давления следует прибавить поправку, учитывающую влияние эффекта FEF. Поправка вычисляется по формуле (3).

Следовательно, для корректного прогнозирования эффективности воздействия пусковой динамической нагрузки аэроакустического типа на КА (в частности, влияния эффекта FEF на величину динамической нагрузки) необходимо разработать теоретическую модель процесса формирования локальных акустических полей в отсеке ГО. На основании такой модели должны быть рассмотрены физические процессы, которыми обусловлено

динамическое воздействие пусковой нагрузки аэроакустического типа на корпус КА. Для разработки такой модели целесообразно использовать результаты экспериментальных исследований локальных акустических полей (формирующихся в отсеке ГО), приведённые, в частности, в работах [4, 5].

В этих работах представлены экспериментальные результаты, полученные в ходе стендовых и натурных исследований характеристик локальных акустических полей, формирующихся в отсеке ГО на этапе пуска РН «Titan IV», в котором был размещён КА «Cassini».

Стендовые экспериментальные исследования [4] спектральных характеристик акустического поля, формирующегося в отсеке ГО, проводились в Научно-исследовательском центре NASA «LeRC». Для проведения исследований был использован макетный образец ГО, в котором размещался макет КА.

В ходе стендовых экспериментальных исследований в отсеке ГО размещались макетные образцы КА различной формы и габаритных размеров [4]. Кроме того, лаборатория «Jet Propulsion laboratory» (JPL) провела акустические измерения в натурных условиях [5] на этапе пуска РН (КА «Cassini» был размещён в отсеке ГО).

Для систематизации результатов измерений характеристик акустических полей [4] на стенде в Центре NASA «LeRC» весь внутренний объём ГО был разбит на 6 измерительных зон (№№ 2 – 7), в каждой из которых были размещены измерительные микрофоны (всего 21 микрофон).

Кроме того, микрофоны размещались около внешней поверхности ГО (в зоне № 1) для контроля за параметрами диффузного акустического поля (формирующегося в реверберационной камере в Центре NASA «LeRC»), оказывающего динамическое воздействие на корпус ГО. Результаты акустических измерений, проведённых в Центре NASA «LeRC», представлены, в работе [4].

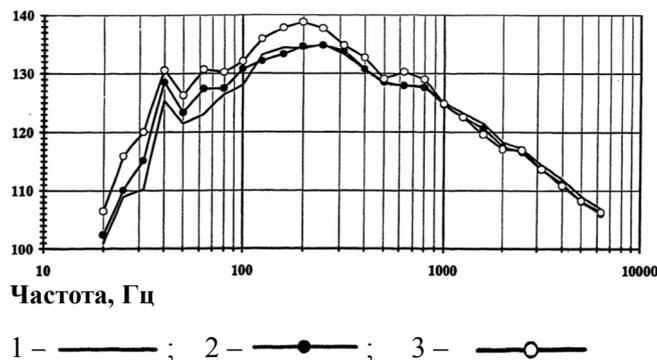
Анализ результатов измерений [4] (усреднённых для каждой зоны) показывает, что в конической части объёма отсека ГО формируется звуковое поле с максимальными уровнями звукового давления в диапазоне частот 150 – 1000 Гц. В области низких частот (≥ 200 Гц) поле становится неоднородным.

В то же время в кольцевой щелевидной полости (между корпусами ГО и КА), в которой были размещены 12 микрофонов, выделяются низкочастотные тональные составляющие звукового давления (прежде всего, на частоте 40 Гц).

Для исследования влияния габаритных размеров макета КА на характеристики локального акустического поля (формирующегося в щелевидной полости между корпусами ГО и КА) в Центре NASA «LeRC» были проведены измерения акустических характеристик локального акустического поля в трёх случаях. А именно, в двух случаях, когда в отсеке ГО последовательно размещались макеты КА в виде цилиндрических оболочек различного диаметра: $\Phi_{cyl}^1 = 114,6$ дюйма; $\Phi_{cyl}^2 = 143,7$ дюйма. Кроме того, была измерена характеристика акустического поля в пустом отсеке ГО (без КА).

Согласно результатам измерений в щелевидной полости между корпусами ГО и КА (т. е. в зоне № 3), представленным в работе [4] и на рис. 1, при уменьшении зазора между корпусами ГО и КА (благодаря увеличению диаметра Φ_{cyl} цилиндрической оболочки) уровень тональной составляющей (на частоте 40 Гц) возрастает со 128,5 до 130,6 дБ. В пустом отсеке ГО уровень этой составляющей минимален (125,3 дБ).

Уровень звукового давления, дБ



Результаты измерений [4] акустических спектров в зоне № 3 макета отсека ГО в случае, когда: 1 – отсек ГО пуст; 2, 3 – в отсеке ГО размещена цилиндрическая оболочка (макет КА), соответственно, среднего размера (114,6 дюйма) и большого размера ($\Phi_{cyl}^2 = 143,7$ дюйма)

Анализ результатов измерений, проведённых в Центре NASA «LeRC» (см. рис.) [4], показывает, что эффект FEF проявляется в низкочастотной области (в наибольшей степени в диапазоне частот ниже 250 Гц). В диапазоне средних частот (250 – 800 Гц) эффект FEF незначителен, а в диапазоне частот $f \geq 1000$ Гц этот эффект вообще никак не проявляется. Аналогичные результаты получены в

результате экспериментальных исследований и расчетов, представленных в работах [5 – 10].

Результаты экспериментальных исследований были использованы при разработке стандартов NASA [4; 7]. В соответствии с этими стандартами, при разработке программы наземных испытаний КА следует учитывать влияние эффекта FEF на параметры динамического нагружения КА на наземном испытательном стенде.

Как отмечено в работах [4, 7], эффект FEF может привести к усилению динамического воздействия на корпус КА (или внешних навесных устройств КА, таких как антенны и солнечные батареи), только в области низких частот.

Согласно результатам измерений (см. рис.) [4], именно в области низких частот (в частности, на частоте 40 Гц) эффект FEF приводит к существенному повышению уровня звукового давления в щелевидной полости (зона № 3), прежде всего на собственных частотах акустических мод колебаний объема ГО.

Анализ результатов исследований эффекта FEF, представленных в [4 – 10], показывает, что пока не удалось установить причины, которыми обусловлено возникновение этого эффекта. Сформулированные авторами гипотезы противоречивы.

Целью данной работы является оценка влияния локальных акустических полей (и, в частности, эффекта FEF) на параметры пускового динамического воздействия на корпус КА. Решение этой задачи возможно на основе анализа процессов, связанных с формированием локального акустического поля в кольцевой щелевидной полости (между корпусами ГО и КА).

Анализ процессов формирования локальных акустических полей в отсеке ГО на этапе пуска РН

Как было отмечено выше, на этапе пуска РН в результате комплексного динамического нагружения (обусловленного воздействием нагрузки аэроакустического типа) в корпусной конструкции отсека ГО возбуждается вибрационное поле. Энергия вибрационного поля распределена преимущественно между модами собственных структурных колебаний корпусной конструкции. На каждой частоте амплитуда виброскорости в вибрационном поле определяется путём суммирования всех мод собственных изгибных колебаний корпусной конструкции ГО.

В соответствии с этой моделью суммарная амплитуда виброскорости $\tilde{v}_n(x, y, \omega)$ на корпусе ГО (компонента, виброскорости ориентированная по нормали к поверхности корпуса ГО) вычисляется с помощью выражения [3]:

$$\tilde{v}_n(x, y, \omega) = \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \varphi_{pq}(x, y) \tilde{v}_{pq}(\omega), \quad (4)$$

где $\tilde{v}_{pq}(\omega)$ – модальные амплитуды виброскорости, $p, q = 1, 2, \dots$; $\varphi_{pq}(x, y)$ – нормализованная форма собственных структурных мод корпуса ГО.

В соответствии с теорией излучения «структурного» акустического шума [3] при изгибных колебаниях конструктивных элементов корпуса ГО излучаются звуковые волны. При этом эффективность трансформации вибрационной энергии в акустическую энергию (энергию звуковых волн) зависит, прежде всего, от таких параметров, как: частота колебаний, форма собственных колебаний конструктивного элемента, объём и форма полости, в которой формируется поле «структурных» акустических волн.

Для проведения приближённых инженерных расчётов, предусматривающих прогнозирование эффективности излучения конструктивным элементом структурного шума (в частности, для вычисления уровней мощности W_{ac} акустического излучения), обычно используется формула Кремера [3].

При моделировании процесса излучения «структурного» (вибрационного) шума корпусом ГО частотный диапазон разбивается на три поддиапазона. В качестве граничных частот этих поддиапазонов используются две характерные частоты цилиндрической оболочки [3]: кольцевая частота f_{ring} и критическая частота f_{Cr} . На кольцевой частоте длина изгибной волны равна длине окружности цилиндрической оболочки, а на критической частоте длина изгибной волны в конструкции равна длине звуковой волны в воздухе.

В области высоких частот (в диапазоне $f \geq f_{ring}$) эффективность излучения звуковых волн цилиндрической оболочкой эквивалентна эффективности излучения звука плоской пластиной. Критическая частота f_{Cr} разделяет частотный диапазон (ограниченный сверху частотой f_{ring}) на две области с принципиально различным характе-

ром излучения структурного шума, а именно, области «быстрых» и «медленных» акустических мод.

В высокочастотном диапазоне (в области «быстрых акустических мод») длина звуковой волны в воздухе меньше длины изгибной волны в корпусе ГО, поэтому вибрирующий корпус обтекателя эффективно излучает звуковые волны и в дальней зоне акустического поля (зоне дифракции Фраунгофера) формируется поле цилиндрических и сферических звуковых волн. Причём эффективность излучения структурного шума в этом диапазоне частот практически не зависит от частоты (а именно, коэффициент излучения звука примерно равен 1).

В дальней зоне акустического поля сдвиг фаз между колебательной скоростью частиц воздуха и звуковым давлением равен 0, поэтому частицы воздуха перемещаются по линейной траектории (в направлении распространения звуковых волн).

В низкочастотном диапазоне эффективность излучения звуковых волн существенно снижается [3], поскольку для «медленных мод» длина звуковой волны в воздухе больше, чем длина изгибной волны в конструктивном элементе ГО. Вследствие этого, за период колебаний происходит взаимная компенсация пульсаций давления, которые возбуждаются смежными участками конструкции, колеблющимися в противофазе. Поэтому звуковые волны не излучаются, и для однородной безграничной конструкции имеет место так называемое «акустическое или гидродинамическое короткое замыкание». В результате этого явления вибрационная энергия трансформируется не в энергию звуковых волн, а в энергию пульсаций давления (т. е. в колебательную энергию).

В области низких частот из ближней зоны акустического поля энергия пульсаций давления не передаётся в дальнюю зону акустического поля, а просто плавно перетекает вдоль поверхности конструкции между колеблющимися в противофазе участками конструкции (при этом расстояние между узловыми линиями в корпусной конструкции ГО меньше половины длины звуковой волны).

Поскольку в действительности размеры конструктивных элементов ГО (а именно, длина цилиндрической части ГО) ограничены, краевые области конструктивных элементов всё же излучают звуковые волны, так как рядом с этими краевыми областями нет смежных участков, колеблющихся в противофазе. Поэтому колебания краевых областей не компенсируются. Однако эффективность этого звукового излучения невелика, вследствие ограни-

ченных размеров краевых областей корпусной конструкции ГО.

В соответствии с теорией акустического излучения в непосредственной близости от корпусной конструкции ГО формируется «ближняя зона» акустического поля. Ближняя зона в свою очередь подразделяется на гидродинамическую и геометрическую ближние зоны [11, 12].

Формирование акустического поля в гидродинамической ближней зоне обусловлено гидродинамическими пульсациями (флюктуациями) давления около поверхности корпуса ГО. Пульсации давления возбуждаются вследствие изгибных колебаний корпуса ГО на низких частотах. Энергия этих колебаний корпуса передаётся прилегающим частицам воздуха. В результате трансформации вибрационной энергии в энергию пульсаций давления в гидродинамической ближней зоне формируется комплексное акустическое поле, в котором энергия распределена между активной и реактивной компонентами поля.

В области низких частот именно пульсациями (флюктуациями) давления в гидродинамической ближней зоне обусловлено формирование локальных акустических полей в щелевидной полости.

Для определения характеристик локальных акустических полей (в частности, потенциала акустического поля $\varphi(r)$, где r – расстояние от излучателя звуковых волн до точки наблюдения) в общем случае используется уравнение Гельмгольца.

В области низких частот в непосредственной близости от вибрирующей корпусной конструкции ГО формируется гидродинамическая ближняя зона акустического поля. Размер этой зоны r_n (вдоль нормали к поверхности корпусной конструкции ГО) определяется двумя соотношениями для длины пространственной структурной волны L_{sp} (которая возбуждается в корпусной конструкции ГО) [11]: $r_n \ll L_{sp} / 2\pi$; $\lambda_{ac} \gg L_{sp}$, где λ_{ac} – длина звуковой волны (в воздухе).

В этом случае уравнение Гельмгольца трансформируется в уравнение Лапласа (с помощью которого описываются колебательные процессы в несжимаемой среде): $\Delta\varphi(r) = 0$. Как известно, в несжимаемой среде не могут возбуждаться упругие волны (волны сжатия/разрежения) и звуковое давление $P(r, \omega) = 0$.

На практике в гидродинамической ближней зоне акустического поля всё же возбуждаются звуковые волны (поскольку воздушная среда лишь

приближённо рассматривается как несжимаемая, а в действительности характеризуется незначительными упругими свойствами).

Однако около вибрирующей поверхности ГО амплитуда звукового давления во много раз меньше амплитуды колебательной скорости, причём сдвиг фаз $\Delta\theta$ между давлением и колебательной скоростью в гидродинамической ближней зоне составляет: $\Delta\theta \approx 90^\circ$. Вследствие такого сдвига фаз $\Delta\theta$ частицы воздуха в гидродинамической ближней зоне перемещаются по траектории, имеющей форму эллипса [11].

Таким образом, в диапазоне низких частот (т. е. в случае, когда скорость распространения изгибных волн меньше скорости звука в среде) конструктивные элементы ГО (по которым распространяются структурные волны) практически не излучают звуковые волны, поскольку могут возбуждать в щелевидной полости только акустически «медленные» моды. В этом случае (когда $k_u > k_0$, где k_u , k_0 – соответственно, волновое число в корпусной конструкции и в воздухе), звуковые волны в направлении, перпендикулярном к поверхности корпуса ГО, не излучаются.

Непосредственно около поверхности корпуса ГО формируется гидродинамическая ближняя зона акустического поля, в которой могут возбуждаться только неоднородные акустические волны (в отличие от звуковых волн, возбуждающихся в дальней зоне акустического поля).

Поскольку звуковая волна (сжатия/разрежения) не может сформироваться в несжимаемой среде, почти вся энергия вибрационного поля трансформируется в энергию неоднородных акустических волн. Колебательная энергия в неоднородной волне просто перекачивается (в виде пульсаций давления) вдоль поверхности конструкции ГО от участка среды, прилегающего к одной полуволне пространственной структурной (изгибной) волны, к участку, прилегающему к соседней (противофазной) полуволне изгибной волны и обратно. Корпусная конструкция ГО в низкочастотном диапазоне колеблется в режиме «акустического короткого замыкания».

Таким образом, колебательная энергия, которая передаётся от вибрирующей корпусной конструкции ГО в прилегающую к ней воздушную среду, не излучается (в виде звуковых волн). Эта энергия существует в некотором присоединённом объёме воздушной среды (в присоединённой массе) в виде кинетической энергии частиц среды.

Следовательно, в гидродинамической ближней зоне энергия низкочастотных колебаний (пульсаций давления) остаётся «связанной» с вибрирующей корпусной конструкцией ГО, т. е. эта часть энергии не передаётся в дальнюю зону акустического поля. Гидродинамическая ближняя зона акустического поля примыкает непосредственно к поверхности вибрирующей корпусной конструкции ГО, её габаритный размер (ширина) значительно меньше длины звуковых волн в воздухе (обычно размер этой зоны не превышает 100 мм) [11, 12].

Для приближённого расчёта параметров акустического поля в гидродинамической ближней зоне используется упрощённая модель [3], в соответствии с которой усреднённое значение мощности акустического излучения $\bar{P}(\omega)$ определяется путём интегрирования произведения двух комплексно сопряжённых амплитуд. Амплитуды $\tilde{p}(x, y, 0, \omega)$ давления в акустической волне (непосредственно около поверхности корпуса ГО) и нормальной (по отношению к поверхности корпуса ГО) компоненты амплитуды колебательной скорости $\tilde{v}_n(x, y, \omega)$, вычисляемой с помощью (4). Усреднённое (по времени) значение звуковой мощности приближённо вычисляется с помощью выражения (на основе интеграла Релея) [3]:

$$\bar{P}(\omega) = (1/2) \int_0^a \int_0^b \operatorname{Re}[\tilde{v}_n(x, y, \omega)^* \tilde{p}(x, y, 0, \omega)] dx dy, \quad (5a)$$

$$\tilde{p}(x, y, 0, \omega) = (j\omega\rho_0 / 2\pi) \int_0^a \int_0^b \tilde{v}_n(x', y', \omega) [\exp(-jkR) / R] dx' dy', \dots (5b)$$

где символом * обозначена операция комплексного сопряжения амплитуд колебательного давления и скорости; x, y – координаты точки наблюдения в звуковом поле; x', y' – координаты точки наблюдения на поверхности корпуса ГО; a, b – размеры корпусного конструктивного элемента (в плане); R – расстояние между этими точками:

$$R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}.$$

Как отмечено ранее, при изгибных колебаниях корпусной конструкции ГО колебательная энергия передаётся частицам среды в слое воздуха, прилегающем к конструкции. Вследствие этого процесса, изменяется внутренняя энергия частиц воздуш-

ной среды, и в результате они приобретают кинетическую энергию. Плотность кинетической энергии вычисляется с помощью выражения: $E_{kin} = 0,5\rho v^2$, где v, ρ – колебательная скорость и плотность частиц среды около поверхности корпуса ГО.

Таким образом, в непосредственной близости от поверхности корпусной конструкции реактивная компонента кинетической энергии, которая передается корпусной конструкцией среде, не трансформируется в активную компоненту акустической энергии (т. е. в энергию звуковых волн).

Эта реактивная компонента энергии остаётся кинетической энергией присоединённой массы некоторого объёма среды, прилегающего к поверхности ГО. В гидродинамической ближней зоне сдвиг фаз между колебательной скоростью частиц и звуковым давлением приближается к 90° .

При таком сдвиге фаз колебания частиц среды сопровождаются возбуждением чисто реактивной компоненты акустической энергии, сосредоточенной около поверхности ГО.

Ранее было отмечено, что это колебательное движение частиц среды вдоль поверхности корпусной конструкции ГО (в виде пульсаций давления) может, тем не менее, рассматриваться как волновое движение так называемых «неоднородных волн» [13 – 15] (эти пульсации давления называют также «псевдозвуком»). Неоднородная волна, в отличие от звуковых волн, может существовать и в несжимаемой среде.

С физической точки зрения, «неоднородные волны» (или «псевдозвук») представляют собой колебательное движение среды (около поверхности конструкции), распространяющееся практически только вдоль корпусной поверхности. При удалении от корпусной поверхности по нормали к ней (вдоль координатной оси z) неоднородные волны очень быстро затухают (по экспоненциальному закону), поскольку им соответствует реактивная компонента акустической энергии.

Энергия неоднородной волны колебательной скорости, распространяющейся вдоль поверхности корпусной конструкции ГО с фазовой скоростью c_ϕ (которая всегда меньше скорости звука в среде c_0), не может передаваться в дальнюю зону акустического поля (в виде энергии звуковых волн), поэтому вся энергия неоднородной волны сосредоточена около поверхности корпусной конструкции ГО [13 – 15].

Для описания процесса распространения неоднородной волны (около поверхности корпуса ГО в плоскости параллельной корпусной поверхности) в любом из направлений (вдоль одной из координатных осей: x или y), как и в случае распространения в среде однородной плоской волны, используется уравнение Гельмгольца.

В этом модифицированном уравнении Гельмгольца для неоднородной волны действительный волновой вектор \vec{k} заменён на комплексный волновой вектор $(\vec{\xi} + i\vec{\alpha})$, где $\vec{\xi}$ – волновое число для неоднородной волны; $\vec{\alpha} = \sqrt{\vec{\xi}^2 - k^2}$. Если выполняется условие: $\vec{\xi}\vec{\alpha} = 0$, то давление в неоднородной плоской волне описывается выражением [13]:

$$P = \exp[i(\vec{\xi} + i\vec{\alpha})\vec{r}] \quad (6)$$

Направление распространения этой неоднородной плоской волны (вектор скорейшего изменения фазы) совпадает с вектором $\vec{\xi}$, в этом направлении амплитуда волны неизменна. Вектор скорейшего изменения амплитуды совпадает с вектором $\vec{\alpha}$, соответственно, в направлении этого вектора постоянна фаза волны. Причём однородную плоскую волну можно рассматривать как предельный случай неоднородной волны (при выполнении условия: $\alpha \rightarrow 0$). Таким образом, неоднородную волну можно рассматривать как гармоническую волну с комплексным волновым вектором.

Частицы воздуха в неоднородной волне (в плоскости x, y) перемещаются по эллиптическим траекториям [13], причём малая ось эллипса направлена в сторону скорейшего изменения амплитуд, а большая ось направлена в сторону скорейшего изменения фазы, т. е. в сторону распространения фронта волны.

Как было отмечено выше, в гидродинамической ближней зоне акустического поля частицы воздуха перемещаются именно по эллиптической траектории. Таким образом, в гидродинамической ближней зоне акустического поля (около поверхности ГО) формируется поле плоских неоднородных акустических волн. Причём движение частиц воздуха (по эллиптическим траекториям) в неоднородной волне описывается с помощью модифицированного уравнения Гельмгольца.

В области низких частот в гидродинамической ближней зоне формируется поле неоднородных

(поверхностных) акустических волн, которые возбуждаются при передаче частицам воздуха энергии изгибных структурных волн, распространяющихся в корпусной конструкции ГО. Это поле может быть представлено в виде суперпозиции плоских неоднородных волн, распространяющихся под разными углами θ к оси, причём неоднородным волнам соответствуют комплексные значения углов θ [14].

В гидродинамической ближней зоне неоднородная акустическая волна взаимодействует со структурной изгибной пространственной волной, которая возбуждается в результате воздействия на ГО динамической нагрузки аэроакустического типа и распространяется по корпусной конструкции ГО.

Форма структурных мод $\varphi_r(x, y)$ собственных изгибных колебаний корпусной конструкции ГО описывается с помощью известного выражения:

$$\varphi_r(x, y) = \sin[\pi(i_r x / L_x)] \sin[\pi(j_r y / L_y)],$$

где $L_x = 2\pi(R_{ГО})$; $R_{ГО}$, L_y – соответственно, радиус и длина цилиндрической части корпуса ГО.

В результате интерференции этих волн (неоднородной волны и структурной изгибной волны) в гидродинамической ближней зоне формируется интерференционное акустическое поле с неоднородной структурой в виде чередующихся интерференционных максимумов и минимумов. При этом, согласно результатам расчётов [9], выполненных для реальных габаритных размеров отсека ГО, первые интерференционные максимумы возбуждаются в диапазоне низких частот ($f < 100$ Гц).

Если в отсеке ГО размещён КА, то поле неоднородных акустических волн формируется в полости щелевидной формы. В этой полости неоднородные волны распространяются как в узком волноводе, в котором сконцентрирована вся колебательная энергия. В направлении нормали к поверхности корпуса ГО давление в неоднородной волне $p(z)$ затухает по экспоненциальному закону:

$$p(z) = P_0 \exp[-z(k_u^2 - k_0^2)^{1/2}],$$

где P_0 – амплитуда давления около корпусной поверхности ГО.

Согласно представленным на рис. результатам экспериментальных исследований [4], чем больше ширина щелевидной полости H_{Gap} , тем меньше уровень колебательного давления на первой собственной частоте (40 Гц) локального акустического поля, которое формируется в щелевидной полости. В пустом отсеке ГО (в котором не размещён КА)

уровень этой тональной составляющей (на частоте 40 Гц) снизился на 3 дБ.

Таким образом, согласно [4], по мере увеличения габаритного размера корпуса КА последовательно повышаются уровни звукового давления (по-видимому, вследствие уменьшения свободной части объема щелевидной полости ГО) в низкочастотной области (преимущественно, в частотном диапазоне $f \leq 100$ Гц).

Как известно, при формировании акустического поля в отсеке ГО (т. е. в замкнутом объёме ограниченного размера) уровень звукового давления зависит от плотности акустической энергии в объёме отсека ГО. Для вычисления уровня звукового давления используется известное выражение [4]:

$$L_p = 20 \lg[\rho_0 c_0^2 (E_\Sigma / V_{ГО})], \quad (7)$$

где ρ_0, c_0 – плотность и скорость звука в воздухе; $V_{ГО}$ – объём отсека ГО; E_Σ – суммарная энергия акустического поля, формирующегося в отсеке ГО.

Энергия E_Σ акустического поля распределена преимущественно между собственными акустическими модами свободного объёма отсека ГО, поэтому $E_\Sigma = \sum_{i=1}^N e_i^{\text{mod}}$, где N – число собственных акустических мод колебаний в объёме отсека ГО; e_i^{mod} – акустическая энергия i -й моды собственных колебаний. В области средних и высоких частот для расчётов суммарной акустической энергии (на основе метода СЭА) определяется произведение модальной плотности на среднюю модальную энергию.

В низкочастотной области ($f \leq 100$ Гц), вследствие крайне низкой плотности собственных акустических мод, в объёме щелевидной полости акустическая энергия распределена неравномерно. В частности, согласно [4], в этом диапазоне частот в объёме щелевидной полости ГО возбуждается только одна собственная мода акустических колебаний на собственной частоте $f_1 = 40$ Гц. Соответственно, в поле неоднородной акустической волны энергия сосредоточена в областях максимумов этой формы собственных колебаний (которая возбуждается на частоте $f_1 = 40$ Гц).

Согласно [4] (см. рис.), в спектре (измеренном в цилиндрической части отсека: в зоне № 3) выделяется максимум на частоте $f_1 = 40$ Гц как в случае, когда отсек ГО «заполнен» макетом КА, так и в

пустом отсеке ГО. Причём в спектре, измеренном в конической части отсека ГО, этого максимума нет. По-видимому, при изгибных колебаниях корпусной конструкции ГО в кольцевой щелевидной полости (в гидродинамической ближней зоне акустического поля) формируется поле неоднородных акустических волн. Причём на первой собственной частоте неоднородной волны (на частоте $f_1 = 40$ Гц) возбуждается резонансный максимум.

В макетном образце отсека ГО, использованном для исследований в центре NASA «LeRC» [4], длина $l_{ГО}^{шип}$ цилиндрической части отсека ГО составляла 4,3 м, поэтому первая собственная мода неоднородных акустических волн возбуждается в отсеке ГО (в гидродинамической ближней зоне поля) на собственной частоте колебаний $f_1 = 40$ Гц. На этой частоте по всей длине цилиндрической части корпуса ГО укладывается половина длины акустической волны λ_{ac} . Таким образом, согласно результатам расчётов, в макетном образце отсека ГО в области низких частот (а именно, на первой собственной частоте $f_1 = 40$ Гц) возбуждается первая собственная мода неоднородной акустической волны. По-видимому, эффект FEF (т. е. повышение уровня звукового давления) в отсеке ГО обусловлен именно возбуждением неоднородных акустических волн. Результаты расчётов удовлетворительно согласуются с результатами экспериментальных исследований, представленными в работе [4].

Выше было отмечено, что, в результате интерференции неоднородной акустической волны со структурной волной в гидродинамической ближней зоне образуются интерференционные максимумы и минимумы. Поэтому в отсеке ГО в низкочастотной области акустическая энергия сосредоточена преимущественно в области интерференционных максимумов акустического поля. Это поле формируется в результате интерференции двух связанных собственных мод (неоднородной акустической волны и структурной волны).

Таким образом, вследствие формирования локального акустического поля (поля неоднородных акустических волн), в щелевидной полости отсека ГО в области низких частот ($f \leq 100$ Гц) уровни колебательного давления L_p повышаются преимущественно на собственных частотах этого поля.

В соответствии с выражением (7), в щелевидной полости отсека ГО уровень звукового давления L_p

повышается благодаря повышению плотности акустической энергии ($E_\Sigma / V_{ГО}$) в гидродинамической ближней зоне акустического поля. В этой зоне формируется поле неоднородных акустических волн, которые быстро затухают (по экспоненциальному закону) в направлении нормали к корпусной поверхности ГО.

В соответствии с изложенным, энергия неоднородных акустических волн сконцентрирована в непосредственной близости от внутренней поверхности корпуса ГО (в гидродинамической ближней зоне). Поэтому реактивная компонента суммарной энергии (E_Σ)_{реак} в поле неоднородных волн не изменится при размещении КА в полости отсека ГО. В то же время, объём щелевидной полости отсека ГО меняется при изменении габаритного размера КА (т. е. при изменении объёма щелевидной полости, вследствие изменения величины зазора H_{Gap} между корпусами ГО и КА).

Объём щелевидной полости равен: $V_{cav} = \pi l_{cyl} (R_{ГО}^2 - r_{КА}^2)$, где $R_{ГО}$, $r_{КА}$ – соответственно, эквивалентные радиусы корпуса отсека ГО и корпуса КА; l_{cyl} – длина корпуса КА, размещённого в отсеке ГО. При уменьшении величины зазора H_{Gap} ($H_{Gap} = R_{ГО} - r_{КА}$) между корпусами ГО и КА (с учётом неизменной длины волновода l_{cyl})

объём кольцевой щелевидной полости V_{cav} уменьшается. При этом увеличится плотность реактивной компоненты энергии (E_Σ)_{реак} / V_{cav} , распределённой в объёме щелевидной полости.

В пустом отсеке ГО (когда $r_{КА} = 0$) поле неоднородных акустических волн формируется около внутренней поверхности корпуса ГО (в гидродинамической ближней зоне акустического поля), причём энергия неоднородной волны сконцентрирована около внутренней поверхности корпуса ГО. Согласно [4], на первой собственной частоте ($f = 40$ Гц) уровень звукового давления в пустом отсеке ГО L_p^{Em} ниже, чем в «заполненном» отсеке ГО. В то же время, в «заполненном» отсеке ГО чем меньше величина зазора H_{Gap} (между корпусами ГО и КА), тем выше уровень давления L_p^F .

В соответствии с формулой (7), при «заполнении» отсека ГО корпусом КА, уровень L_p^F повышается вследствие увеличения плотности энер-

гии неоднородных волн. Плотность энергии $(E_{\Sigma})_{реак} / V_{cav}$ увеличивается за счёт уменьшения свободного объёма V_{cav} щелевидной полости отсека ГО.

Следует отметить, что, согласно (см. рис.) [4], вследствие эффекта FEF, уровни звукового давления L_p повышаются в диапазоне низких частот (преимущественно в диапазоне частот 20 – 300 Гц). Причём повышение уровня L_p отмечено не только для тональной составляющей (на собственной частоте $f_1 = 40$ Гц), но и для широкополосного шума (в частности, в диапазоне частот 50 – 250 Гц).

В то же время, согласно [4], эффект FEF существенен только при размещении в объёме отсека ГО «большой» цилиндрической оболочки, в этом случае величина FF варьировалась от 4 до 10 дБ (в диапазоне частот 20 – 100 Гц). При замене «большой» оболочки на оболочку «среднего» размера величина FF варьировалась от 1 до 5 дБ (в диапазоне частот 20 – 100 Гц), а на частотах f превышающих 1000 Гц величина $FF = 0$.

Согласно [4], зазор между корпусом ГО и цилиндрической оболочкой «среднего» размера (которая использовалась в качестве макета корпуса КА) был равен $H_{Gap} = 0,5$ м, а зазор между корпусом ГО и цилиндрической оболочкой «большого» размера равен $H_{Gap} = 0,267$ м.

Следовательно, в случае, когда величина зазора $H_{Gap} \geq (0,6)$ м, влияние эффекта FEF на уровни звукового давления L_p^F в локальных акустических полях (формирующихся в зазоре, между корпусами ГО и КА) пренебрежимо мало.

По-видимому, этот результат обусловлен уменьшением плотности энергии неоднородных волн, вследствие увеличения свободного объёма V_{cav} при увеличении зазора H_{Gap} . Как было отмечено выше, при удалении от внутренней поверхности цилиндрической части корпуса ГО неоднородные волны затухают по экспоненциальному закону. Поэтому при больших значениях зазора H_{Gap} (превышающих 0,6 м), плотность энергии неоднородных волн в зазоре (между корпусами ГО и КА) увеличивается незначительно (по сравнению с плотностью энергии в пустом отсеке ГО).

Как было отмечено выше, в гидродинамической ближней зоне помимо неоднородных акустических волн («псевдозвуковых волн») возбуждаются и

звуковые волны (вследствие ограниченных размеров корпусной конструкции ГО). Однако амплитуда звукового давления в этих звуковых волнах (которые квалифицируются как активная компонента акустического поля) значительно меньше амплитуды пульсаций давления в неоднородных волнах.

В то же время неоднородные волны очень быстро затухают при удалении от поверхности корпусной конструкции ГО, поэтому энергия неоднородных волн не передаётся в дальнюю зону акустического поля.

Таким образом, неоднородные акустические волны (в отличие от звуковых волн) не оказывают динамического воздействия на корпус КА (энергия этих волн сконцентрирована около поверхности корпуса ГО).

Следует подчеркнуть, что при проведении измерений уровней звукового давления в гидродинамической ближней зоне с помощью стандартного измерительного микрофона определяется суммарный уровень звукового давления P_{Σ} , соответствующий сумме активной и реактивной компонент акустического поля. То есть микрофон измеряет суммарную амплитуду давления, которая складывается из амплитуды давления в звуковых волнах P_S и из амплитуды пульсаций давления в неоднородных волнах P_{Inh} : $P_{\Sigma} = P_S + P_{Inh}$.

На мембрану микрофона оказывают одинаковое воздействие как звуковые волны (звуковые колебания) так и неоднородные акустические волны (пульсации давления), поэтому разделить активную и реактивную компоненты акустического поля с помощью стандартной методики измерений невозможно. Исходя из этого, в соответствии с действующими международными стандартами, измерения шумовых характеристик машин проводятся исключительно в дальней зоне акустического поля.

Для отдельного измерения активной и реактивной составляющих акустического поля в гидродинамической ближней зоне следует использовать метод акустической интенсивности, позволяющий измерить активную и реактивную составляющие интенсивности звука (в отдельности) с помощью специального двухмикрофонного зонда.

Однако в центре NASA «LeRC», согласно [4], для определения характеристик акустических полей в щелевидной полости низкочастотные акустические измерения проводились в ближней зоне акустического поля с помощью стандартных микрофонов. Вследствие использования некорректной методики измерений, авторы работы [4] неверно

интерпретировали полученные результаты. Очевидно, что отмеченное в результате измерений повышение уровней звукового давления было обусловлено возбуждением неоднородных акустических волн в гидродинамической ближней зоне, а амплитуды однородных звуковых волн в измерительных точках (расположенных в щелевидной полости, т. е. в измерительной зоне № 3) незначительны (по сравнению с амплитудами пульсаций давления в неоднородных волнах).

Как было отмечено выше, неоднородные волны не оказывают динамического воздействия на корпус КА, поскольку они очень быстро затухают (по экспоненциальному закону) при удалении от поверхности корпуса ГО. Однако в работе [4] авторы ошибочно утверждают, что увеличение измеренных значений уровней звукового давления в щелевидной полости (в зоне № 3) обусловлено увеличением модальной плотности акустических мод (в поле звуковых волн) при «заполнении» отсека ГО макетом КА.

Некорректность выбранной методики экспериментальных исследований стала причиной некорректной трактовки результатов низкочастотных акустических измерений. В действительности, в области низких частот (в частности, при $f \leq 100$ Гц) в гидродинамической ближней зоне возбуждаются практически только неоднородные волны, а амплитуда звукового давления в звуковых волнах пренебрежимо мала.

В Центре NASA «LeRC» в результате экспериментальных исследований, описанных в работе [4], в диапазоне низких частот была измерена амплитуда пульсаций давления в неоднородной акустической волне, а отнюдь не амплитуда звукового давления в звуковых волнах.

Таким образом, на основе анализа процессов формирования локальных акустических полей в отсеке ГО установлено, что на этапе пуска ракеты в щелевидной полости отсека ГО в области низких частот формируется гидродинамическая ближняя зона акустического поля, в которой возбуждаются практически только неоднородные акустические волны. Эти неоднородные волны не оказывают динамического воздействия на корпус КА, поскольку энергия неоднородных волн сконцентрирована около внутренней поверхности цилиндрической секции корпуса отсека ГО.

Результаты теоретического анализа удовлетворительно согласуются с результатами экспериментальных исследований, представленными в работе [4]. Отмеченное в [4] повышение измеренных значений уровней давления в гидродинамической

ближней зоне (при размещении КА в ГО), согласно приведённым в работе [8] результатам анализа расчётной модели акустического поля в отсеке ГО (на основе метода СЭА), обусловлено увеличением плотности собственных акустических мод в объёме отсека ГО. Однако, как подчёркнуто в [8], увеличение уровней давления отнюдь не сопровождается повышением уровней вибрации на корпусных панелях КА.

Эффект FEF обусловлен увеличением плотности энергии неоднородных (псевдозвуковых) акустических волн, которые возбуждаются в щелевидной полости, т. е. увеличением плотности энергии реактивной компоненты акустического поля. Эта энергия распределена преимущественно между собственными модами неоднородных волн. Поэтому эффект FEF не оказывает никакого влияния на динамическое нагружение корпуса КА. В области низких частот (в которой проявляется эффект FEF) в щелевидной полости возбуждаются практически только неоднородные акустические волны, которые не оказывают никакого динамического воздействия на корпус КА и, следовательно, не возбуждают вибрации корпуса КА.

В диапазоне частот, превышающих критическую частоту f_{Cr} , около корпусной поверхности ГО формируется геометрическая ближняя зона акустического поля (зона дифракции Френеля). В геометрической ближней зоне акустическое поле формируется благодаря интерференции звуковых волн (звуковых лучей), излучаемых элементарными (точечными) излучателями звука, расположенными на вибрирующей поверхности корпуса ГО. В результате интерференции волн формируется акустическое поле с чередующимися интерференционными максимумами и минимумами амплитуды звукового давления, т. е. с неоднородной структурой [11, 12]. Волны распространяются вдоль нормали к поверхности корпуса ГО, фронт волны параллелен поверхности корпуса ГО, причём, вследствие большого радиуса кривизны (диаметр ГО равен 4,2 м [4]), кривизна цилиндрической поверхности ГО не оказывает существенного влияния на структуру локального акустического поля (в полости между корпусами ГО и КА).

Таким образом, в области геометрической ближней зоны формируется акустическое поле плоских звуковых волн с неоднородной структурой в виде чередующихся (вдоль нормали к поверхности ГО) максимумов и минимумов амплитуды давления (последний максимум расположен на границе ближней и дальней зоны).

Размер геометрической ближней зоны H_g (вдоль нормали к поверхности ГО) приближённо вычисляется с помощью известного выражения [16]:

$$H_g = (a^2 / \lambda_s) - \lambda_s / 4,$$

где λ_s – длина звуковой волны в воздухе; a – половина наибольшего габаритного размера излучающей поверхности ГО.

Если расстояние между корпусами ГО и КА не превышает величины H_g , то в щелевидной полости сформируется поле стоячих волн. Поле стоячих волн формируется вследствие интерференции между «прямыми» плоскими волнами (излучаемыми вибрирующим корпусом ГО) и волнами, которые отражаются от корпуса КА. Поскольку расстояние между корпусами ГО и КА H_{Gap} обычно не превышает 0,5 м, поле стоячих волн может сформироваться в диапазоне средних и высоких частот. А именно, первый интерференционный максимум в щелевидной полости отсека ГО возбудится в случае, когда выполняется соотношение:

$$H_{Gap} = \lambda_s / 2.$$

Если расстояние между корпусами ГО и КА превышает величину H_g , то за геометрической ближней зоной сформируется дальняя зона акустического поля в виде расходящихся звуковых цилиндрических волн. В этом случае в щелевидной полости поле стоячих волн не сформируется.

Таким образом, в щелевидной полости в области низких частот формируется локальное неоднородное акустическое поле со сложной структурой. Это поле расположено в гидродинамической ближней зоне акустического поля, в непосредственной близости от корпусной конструкции ГО. На частотах, превышающих f_{Cr} , в полости рядом с поверхностью корпуса ГО формируется геометрическая ближняя зона акустического поля.

В общем случае к геометрической ближней зоне примыкает дальняя зона акустического поля (зона дифракции Фраунгофера). Однако, вследствие ограниченной ширины щелевидного пространства H_{Gap} , дальнее акустическое поле может не сформироваться в объёме щелевидной полости (если величина H_{Gap} не превышает размера геометрической ближней зоны: $H_{Gap} \leq H_g$).

В области средних и высоких частот в отсеке ГО (при $f \geq 1000$ Гц) в щелевидной полости формируется акустическое поле, которое подразделяется на геометрическую ближнюю зону и дальнюю зону. В дальней зоне распространяются только однородные звуковые волны, которые оказывают динамическое воздействие на корпус КА. В результате воздействия акустической нагрузки возбуждаются вибрации корпуса КА, которые затем передаются на приборную платформу. Для расчёта характеристик локальных акустических полей в дальней зоне используются методы компьютерного моделирования (в частности, МКЭ; МГЭ; СЭА).

Таким образом, в области средних и высоких частот в объёме щелевидной полости формируется локальное акустическое поле, в котором доминирует активная компонента поля (т. е. звуковые волны). Эти звуковые волны оказывают динамическое воздействие на корпусную конструкцию КА, в результате динамического воздействия возбуждаются собственные структурные моды корпуса КА. Кроме того, под воздействием акустической нагрузки могут возбуждаться вибрации навесных элементов КА (антенн, солнечных батарей).

В области средних и высоких частот в результате воздействия локального акустического поля, которое формируется в щелевидной полости, в корпусной конструкции КА возбуждается вибрационное поле. Для расчёта характеристик этого вибрационного поля можно использовать методику прогнозирования характеристик вибрационных полей при воздействии акустической нагрузки, представленную в работе [17].

При изгибных колебаниях корпуса КА излучаются звуковые волны и в объёме полости приборного отсека КА формируется акустическое поле. Для расчёта акустических характеристик этого поля обычно используется метод СЭА, среднеквадратичное значение амплитуды звукового давления в объёме отсека КА вычисляется с помощью выражения [18, 19]:

$$\langle p^2 \rangle = \rho_0 c_0^2 (E_{KA} / V_{KA}),$$

где ρ_0, c_0 – плотность и скорость звука в воздухе;

$E_{KA} = E_{KA}(\omega)$; E_{KA} – усредненное по пространству и времени значение энергии акустического поля, формирующегося в объёме V_{KA} полости отсека КА; ω – частота колебаний. Акустическая энергия распределена преимущественно между акустическими модами объёма отсека КА V_{KA} , при этом модальная плотность n вычисляется с помощью выражения [18, 19]:

$$n = \omega^2 V_{КА} / (2\pi^2 c_0^3).$$

В приборном отсеке КА в области средних и высоких частот формируется акустическое поле, которое подразделяется на ближнюю зону (гидродинамическую или геометрическую) и дальнюю зону. В дальней зоне распространяются практически только звуковые волны (неоднородные волны быстро затухают), которые оказывают динамическое воздействие на приборную панель КА.

В результате воздействия акустической нагрузки возбуждаются изгибные колебания (вибрации) панели, которые передаются непосредственно на приборы, закреплённые на панели. Следовательно, на приборы оказывают динамическое воздействие вибрации, передающиеся по конструктивным элементам РН через корпус КА на приборную панель и акустическое поле, формирующееся в объёме приборного отсека.

В соответствии с изложенным, в локальных акустических полях, которые формируются в щелевидной полости отсека ГО (между корпусами ГО и КА) и в полости приборного отсека КА, можно выделить активную и реактивную компоненты. Реактивная компонента акустического поля доминирует в области низких частот в гидродинамической ближней зоне акустического поля (в виде неоднородных акустических волн). Активная компонента акустического поля (т. е. звуковые волны) доминирует в дальней зоне акустического поля, которая формируется преимущественно в области средних и высоких частот. Именно активная компонента акустического поля создает динамические нагрузки в конструктивных элементах ГО и КА.

В конической части объёма отсека ГО в результате воздействия динамической нагрузки аэроакустического типа также формируется локальное акустическое поле, структура которого существенно отлична от структуры локальных акустических полей в цилиндрической части объёма отсека ГО (в щелевидной полости).

Согласно результатам экспериментальных исследований [4], в области средних и высоких частот в конической части отсека ГО формируется квазидиффузное однородное акустическое поле. А в области низких частот (когда $f \leq 200$ Гц), вследствие низкой плотности собственных частот объёма, поле становится неоднородным.

Результаты исследований характеристик локальных акустических полей, формирующихся в щелевидной полости могут быть использованы

при проектировании специальных устройств, предназначенных для защиты приборной платформы от динамического воздействия, обусловленного пусковой нагрузкой аэроакустического типа [10, 19].

В частности, для защиты корпуса КА от пусковой динамической нагрузки целесообразно увеличить звукоизолирующую способность корпуса ГО, использовать в конструкции звукопоглощающие, вибропоглощающие и виброизолирующие элементы.

Заключение

1. Анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований [19], связанных с воздействием на КА пусковой динамической нагрузки аэроакустического типа, показывает, что на этапе пуска РН эта нагрузка может стать причиной повреждения электронной аппаратуры, размещённой на приборной платформе КА, а также крупногабаритных тонкостенных навесных элементов (в частности, солнечных батарей, передающих и приёмных антенн).

Поэтому на этапе проектирования КА и отсека ГО большое значение имеет разработка корректных методов прогнозирования параметров динамического нагружения КА в результате воздействия пусковой аэроакустической нагрузки.

2. На основе анализа процессов формирования вибрационных и акустических полей, соответственно, в корпусной конструкции ГО и в полости отсека ГО, определена структура локальных акустических полей, формирующихся в кольцевой щелевидной полости. В общем случае, в этих локальных акустических полях представлены как активная, так и реактивная компоненты поля.

3. В области низких частот процесс формирования локального акустического поля в щелевидной полости принципиально отличен от процесса формирования поля в области средних и высоких частот. В этой области частот в щелевидной полости среда утрачивает упругие свойства, поэтому звуковые волны (активная компонента акустического поля) не могут возбудиться в объёме полости (в несжимаемой среде). Энергия вибрационного поля, которая возбуждается в корпусе ГО, передаётся частицам воздуха в прилегающем слое, но не трансформируется в энергию звуковых волн.

4. В соответствии с результатами анализа процессов формирования локальных акустических полей установлено, что в области низких частот

($f \leq 100$ Гц) в объёме щелевидной полости, в гидродинамической ближней зоне акустического поля формируется поле неоднородных (псевдозвуковых) акустических волн.

5. В области низких частот в объёме щелевидной полости формируется локальное акустическое поле, в котором доминирует реактивная составляющая поля. Установлено, что в полости практически формируется только поле неоднородных (псевдозвуковых) волн, а активная составляющая поля в этой области частот пренебрежимо мала. Энергия реактивной составляющей акустического поля сосредоточена около вибрирующей поверхности корпусной конструкции отсека ГО и не передаётся в дальнюю зону акустического поля. Причём энергия распределена между модами собственных колебаний неоднородных волн, которые быстро затухают (по экспоненциальному закону) в направлении вдоль нормали к вибрирующей корпусной поверхности ГО.

6. Установлено, что, в результате интерференции неоднородных акустических волн и пространственных структурных изгибных волн, распространяющихся по корпусной конструкции ГО (в цилиндрической части ГО), в гидродинамической ближней зоне возбуждается локальное интерференционное акустическое поле. Это поле характеризуется неоднородной структурой в виде чередующихся интерференционных максимумов и минимумов. Именно эти интерференционные максимумы в поле неоднородных акустических волн квалифицируются рядом зарубежных специалистов как «эффект заполнения» [«Fill Effect»], которым, согласно [4, 7], обусловлено дополнительное акустическое нагружение корпуса КА.

Однако, в действительности, энергия поля неоднородных акустических волн практически не передаётся за пределы гидродинамической ближней зоны акустического поля. Поэтому увеличение уровня колебательного давления в поле неоднородных волн («эффект заполнения») не приводит к дополнительному динамическому нагружению корпуса КА (в частности, к повышению уровней виброскорости на корпусной конструкции КА).

7. Установлено, что физическая природа «эффекта заполнения» заключается в увеличении плотности энергии неоднородных акустических волн в щелевидной полости при размещении КА в отсеке ГО.

Именно увеличением плотности энергии неоднородных акустических волн (вследствие «заполнения» отсека ГО) обусловлено повышение уровней давления в поле неоднородных волн, зафикси-

рованное в ходе экспериментальных исследований этого эффекта (FEF) в Научно-исследовательском центре NASA «LeRC».

8. Результаты измерений характеристик акустического поля в отсеке ГО, представленные в работе [4], в области низких частот были некорректно интерпретированы, вследствие использования некорректной методики измерений характеристик локального акустического поля. А именно, в ближней зоне акустического поля измерялись уровни звукового давления вместо измерения уровней интенсивности звука. Вследствие этого, в работе [4] результаты измерений уровней реактивной компоненты акустического поля (т. е. поля неоднородных акустических волн) в гидродинамической ближней зоне поля были ошибочно интерпретированы как результаты измерений активной компоненты поля (т. е. звуковых волн). Однако при измерении уровня акустического давления (вместо уровня интенсивности звука) невозможно отдельно измерять характеристики активных и реактивных составляющих акустического поля.

В действительности, повышение уровней звукового давления в щелевидной полости обусловлено формированием в объёме полости реактивного поля неоднородных акустических волн, энергия которого не передаётся на корпус КА.

9. Локальные акустические поля оказывают динамическое воздействие на корпус КА преимущественно в области средних и высоких частот. Динамическое нагружение корпуса КА пусковой нагрузкой аэроакустического типа обусловлено формированием в щелевидной полости акустических полей в геометрической ближней зоне и в дальней зоне акустического поля. Для расчёта величины динамического нагружения корпуса КА используются методы компьютерного моделирования характеристик акустического поля (в частности, методы МКЭ; МГЭ; гибридный метод СЭА).

10. На основе анализа процессов формирования локальных акустических полей разрабатываются специальные устройства [19], обеспечивающие защиту приборной платформы и навесных устройств (солнечных батарей, антенн) от динамических нагрузок аэроакустического типа. В частности, для снижения уровней звукового давления в приборном отсеке КА используются устройства, повышающие звукоизолирующую способность корпусной конструкции и звукопоглощающие элементы, а для снижения уровней вибрации на приборной панели используются виброизолирующие и вибродемпфирующие элементы.

Литература

1. Arenas J. P., Margasahayam R. N. Noise and vibration of the spacecraft structures // *Ingeniare Revista chilena de ingenieria*. – 2006. – V. 14. – № 3. – P. 251 – 264.
2. Либерман М. Ю. О моделировании процессов формирования пусковых нагрузок, оказывающих динамическое воздействие на космический аппарат // *Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ*. – 2013. – Т. 136. – № 5. – С. 19 – 30.
3. Fahy F. J., Gordonio P. Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response / F. J. Fahy, P. Gordonio. – London : Academic Press, 2007.
4. Hughes W. O., McNelis M. E., Manning J. E. NASA LeRC's acoustic fill effect test program and results // *NASA Technical Memorandum TM-106688*, California, 1994.
5. Himelblau H., Kern D. L., Davis G. L. Summary of Cassini acoustic criteria development using Titan IV flight data // *Journal of the IES*. – 1993. – V. 36. – № 5. – P. 19 – 27.
6. Manning P. A., Lane S. A. A new predictive methodology for launch vehicle fill factors // *Proceedings of «The 19-th Aerospace Testing Seminar, 2000, Manhattan Beach, California*, p. 213 – 223.
7. Dynamic environmental criteria // *NASA Technical Handbook, NASA-HDBK-7005*, 2001.
8. Scharton T. The fill factor, fact or fiction? // *The 2005 Spacecraft & Launch Vehicle Dynamics Environments Workshop, The Aerospace Corporation, El Segundo, CA, 2005*.
9. Ozawa N., Shi Q., Ando S. Investigation of Spacecraft Vibration Subjected to Acoustic Sound Field of Fill Effect // *Proceedings of 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC. Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, April 2011, Denver, Colorado*, p. 5916 – 5926.
10. Howard C. Q. Investigation of Passive Control Devices for Potential Applications to a Launch Vehicle Structures to Reduce the Interior Noise Levels During Launch. Final Report, University of Adelaide, Australia, 2005.
11. Fahy F. J. Sound Intensity. – Second Edition / F. J. Fahy. – London : E&FN Spon, 1995.
12. Fahy F. J. Foundations of Engineering Acoustics / F. J. Fahy. – London : Elsevier-Academic Press, 2005.
13. Исакович М. А. Общая акустика / М. А. Исакович. – М. : Наука, 1973.
14. Шендеров Е. Л. Волновые задачи гидроакустики / Е. Л. Шендеров. – Л. : Судостроение, 1972.
15. Авиационная акустика / под ред. А. Г. Мунина. – М. : Машиностроение, 1986. – Часть 2.
16. Kinsler L. E., Frey A. R. Fundamentals of Acoustics / L. E. Kinsler, A. R. Frey. – New York : John Wiley & Sons, Inc., 2000.
17. Bremner P. G., Blesloch P. A. Validation of Methods to Predict Vibration of Panel in the Near Field of a Hot Supersonic Rocket Plume // *Proceedings of 17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2011, Portland, USA*.
18. Lyon R. H., DeJong R. G. Theory and Application of Statistical Energy Analysis. – 2nd ed. / R. H. Lyon, R. G. DeJong. – Boston : Butterworth-Heinemann, 1995.
19. Conlon S. C., Hambric S. A. Predicting the vibroacoustic response of satellite equipment panels // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 2003. – V. 113. – No. 3. – P. 1455 – 1474.

Поступила в редакцию 26.04.2016

*Михаил Юдимович Либерман, канд. техн. наук, старший научн. сотрудник,
т. (495) 366-21-10, e-mail: mikhail_liberman@mail.ru.
АО «Корпорация «ВНИИЭМ».*

EFFECTS of STARTING DYNAMIC LOADS, FORMED by LOCAL ACOUSTIC FIELDS in PAYLOAD FAIRING COMPARTMENT, on a SPACECRAFT

M.U. Liberman

In the article, results of analysis, performed for local acoustic fields, forming in launch vehicles (LV) payload fairing (PF) compartment due to effects of starting dynamic loads of aero-acoustic type on the PF compartment housing, have been presented. It was established that a field of non-uniform acoustic waves (oscillatory pressures) will form in low frequency bandwidth in the space of slot annulus located between PF housing and SC body. Energy of non-uniform (pseudo-acoustic) acoustic waves concentrates near the internal PF housing surface in the hydro-dynamical near zone of the local acoustic field. Non-uniform acoustic waves will attenuate rapidly with distance from the PF housing surface and consequently make no dynamic effect on the SC body. It was also established that 'infilling effect' will never impact intensity of SC body dynamic loads. This effect is caused by increasing of acoustic energy density in the slot annulus space (if SC is located in PF compartment). In the low frequency range local acoustic field is formed in slot annulus by interference of non-uniform acoustic waves and structural waves exited in the PF compartment. Local acoustic interference field energy is concentrated near the internal PF housing surface, this field has no dynamic effect on SC body.

Key words: local acoustic field; non-uniform acoustic waves; pseudo-acoustic waves; 'infilling effect'; aero-acoustic dynamic load; payload fairing compartment; Spacecraft.

List of References

1. Arenas J. P., Margasahayam R. N. Noise and vibration of the spacecraft structures // *Ingeniare Revista chilena de ingenieria*. – 2006. – V. 14. – № 3. – P. 251 – 264.
2. Liberman M. U. About modeling of starting loads forming having dynamic effect on Spacecraft // *Matters of Electromechanics. VNIEM works*. – 2013. – V. 136. – No. 5. – P. 19 – 30.
3. Fahy F. J., Gordonio P. *Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response* / F. J. Fahy, P. Gordonio. – London : Academic Press, 2007.
4. Hughes W. O., McNelis M. E., Manning J. E. NASA LeRC's acoustic fill effect test program and results // *NASA Technical Memorandum TM-106688*, California, 1994.
5. Himelblau H., Kern D. L., Davis G. L. Summary of Cassini acoustic criteria development using Titan IV flight data // *Journal of the IES*. – 1993. – V. 36. – № 5. – P. 19 – 27.
6. Manning P. A., Lane S. A. A new predictive methodology for launch vehicle fill factors // *Proceedings of «The 19-th Aerospace Testing Seminar, 2000, Manhattan Beach, California*, p. 213 – 223.
7. *Dynamic environmental criteria* // *NASA Technical Handbook, NASA-HDBK-7005*, 2001.
8. Scharton T. The fill factor, fact or fiction? // *The 2005 Spacecraft & Launch Vehicle Dynamics Environments Workshop, The Aerospace Corporation, El Segundo, CA*, 2005.
9. Ozawa N., Shi Q., Ando S. Investigation of Spacecraft Vibration Subjected to Acoustic Sound Field of Fill Effect // *Proceedings of 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC. Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, April 2011, Denver, Colorado, p. 5916 – 5926.
10. Howard C. Q. Investigation of Passive Control Devices for Potential Applications to a Launch Vehicle Structures to Reduce the Interior Noise Levels During Launch. Final Report, University of Adelaide, Australia, 2005.
11. Fahy F. J. *Sound Intensity*. – Second Edition / F. J. Fahy. – London : E&FN Spon, 1995.
12. Fahy F. J. *Foundations of Engineering Acoustics* / F. J. Fahy. – London : Elsevier-Academic Press, 2005.
13. Isakovich M. A. *General acoustics* / M. A. Isakovich. – M. : Наука, 1973.
14. Shenderov E. L. *Wave issues of hydro-acoustics* / E. L. Shenderov. – Leningrad. : Судостроение [Ship-Building], 1972.
15. *Aviation acoustics* / ed. by A. G. Munina. – M. : Машиностроение [Machine Building], 1986. – Part 2.
16. Kinsler L. E., Frey A. R. *Fundamentals of Acoustics* / L. E. Kinsler, A. R. Frey. – New York : John Wiley & Sons, Inc., 2000.
17. Bremner P. G., Belloch P. A. Validation of Methods to Predict Vibration of Panel in the Near Field of a Hot Supersonic Rocket Plume // *Proceedings of 17th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2011, Portland, USA.
18. Lyon R. H., DeJong R. G. *Theory and Application of Statistical Energy Analysis*. – 2nd ed. / R. H. Lyon, R. G. DeJong. – Boston : Butterworth-Heinemann, 1995.
19. Conlon S. C., Hambric S. A. Predicting the vibro-acoustic response of satellite equipment panels // *The Journal of the Acoustical Society of America*. – 2003. – V. 113. – No. 3. – P. 1455 – 1474.

*Mikhail Iudimovich Liberman, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher.
T.: (495) 366-21-10, e-mail: mikhail_liberman@mail.ru.
JC 'VNIEM Corporation'.*