

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ АТТЕСТАЦИИ ЗАГЛУШЁННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ КАМЕР, ОСНОВАННОЙ НА РЕЗУЛЬТАТАХ ИНТЕНСИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

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

Представлены результаты теоретического анализа и экспериментальных исследований метрологических возможностей метода акустической интенсиметрии при проведении аттестации заглушённой акустической камеры в низкочастотном диапазоне. Установлено, что при проведении аттестации камеры в низкочастотном диапазоне метрологические проблемы обусловлены влиянием систематических погрешностей на результаты измерений. Систематические погрешности аттестационных измерений обусловлены возбуждением в объёме камеры реактивных акустических полей. Для устранения систематических погрешностей необходимо обеспечить возможность отдельного измерения характеристик активных и реактивных акустических полей. Установлено, что именно метод акустической интенсиметрии обеспечивает возможность отдельного измерения характеристик активной и реактивной составляющих комплексного акустического поля. Показано, что при использовании акустической интенсиметрии устраняется влияние систематических погрешностей на результаты измерений акустической характеристики активной компоненты акустического поля. Установлено, что для проведения корректной метрологической аттестации заглушённых акустических камер в низкочастотном диапазоне должен использоваться метод акустической интенсиметрии.

Ключевые слова: метрологическая аттестация, заглушённая акустическая камера, низкочастотный диапазон, активная и реактивная компоненты комплексного акустического поля, активная и реактивная компоненты интенсивности звука, звуковые и псевдозвуковые пульсации давления, ближняя зона акустического поля, реактивное акустическое поле стоячих волн, систематические погрешности измерений.

Введение

В соответствии со стандартами [1, 2], для проведения измерений акустических характеристик машин с использованием точного [1] или технического [2] методов измерений, используются, соответственно, заглушённые (безэховые) или полузаглушённые (со звукоотражающим полом) акустические камеры. Для проведения аттестации заглушённых акустических камер используется методика, представленная в стандарте [1] (ГОСТ ISO 3745-2014, приложение А) и в [3]. В соответствии с этой методикой для аттестации камеры проверяется соответствие структуры акустического поля, формирующегося в камере при работе образцового источника шума, требованиям стандарта (методики) [1, 3].

В соответствии с требованиями стандарта [1], для метрологической аттестации камеры в ней проводятся измерения величины скорости спада уровня звукового давления по мере увеличения расстояния между источником звука и точкой измерения, расположенной на измерительной поверхности. На основании результатов этих измерений классифицируется структура формирующегося в камере акустического поля. А именно, поле классифицируется как свободное [1, 3], либо как существенно свободное поле над звукоотражающей поверхностью [2]. Согласно [1, 3], камера может быть аттестована для измерений акустических характеристик машин точным методом в свободном акустическом поле в случае, когда результаты измере-

ний соответствуют результатам расчётов, выполненных в соответствии с «законом инверсии». В качестве критерия, на основании которого устанавливается соответствие акустических условий в камере требованиям методики [1, 3], используется величина отклонения («девиации») экспериментальной характеристики (т. е. измеренной величины спада уровня звукового давления с увеличением расстояния от источника звука) от расчётной характеристики, которая соответствует «закону инверсии».

В соответствии с «законом инверсии», в свободном акустическом поле амплитуда звукового давления, по мере удаления измерительного микрофона от источника звука, который излучает сферические звуковые волны, уменьшается обратно пропорционально расстоянию от источника звука. Этот закон описывается с помощью выражения: $p_2 = p_1(r_1/r_2)$, где p_1 ; p_2 – амплитуды звукового давления в точках измерения № 1 и № 2; r_1 , r_2 – соответственно, расстояние от источника звука до точек измерения № 1 и № 2. В соответствии с «законом инверсии», в свободном акустическом поле уровень звукового давления (L_p^1 ; L_p^2) спадает на 6 дБ при удвоении расстояния от источника звука ($r_2 = 2r_1$):

$$L_p^2 = L_p^1 + 20 \lg(r_1 / r_2) = L_p^1 - 6, \text{ дБ.} \quad (1)$$

Аналогичным образом в отношении интенсивности звука действует «закон обратных квадратов». В свободном звуковом поле по мере удаления микрофона от источника звука, амплитуда интенсивности звука уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния (r) между микрофоном и источником звука: $I \propto 1/r^2$ или $I = P/(4\pi r^2)$, где I , P – соответственно, интенсивность и мощность излучения звука.

С помощью методики, приведённой в [1, 3], аттестационные испытания заглушённых и полуглушённых акустических камер проводятся в базовом частотном диапазоне, включающем в себя 1/3-октавные полосы частот со среднегеометрическими частотами от 100 до 10 000 Гц. На основании метрологической аттестации камеры в этом диапазоне частот измерения проводятся точным [1] либо техническим [2] методом.

В то же время, в 2012 г. был введён в действие новый специализированный стандарт [4, 5], в котором приведено описание альтернативной методики аттестационных испытаний заглушённых акустических камер. Следует, однако, отметить, что, в новом стандарте [4, 5] ISO 26101-2102 в качестве базового принципа, на котором основывается квалификация акустических полей, формирующихся в акустических камерах, также как и в последней редакции стандарта [1] ISO 3745-2014, используется «закон инверсии». Русифицированная версия нового стандарта [4] пока не разработана.

Согласно [4, 5], к основным различиям между методиками аттестации, основанными на применении двух альтернативных стандартов (стандарта [4] или стандарта [1]), следует отнести: использование узкополосного анализа спектра (в 1/3-октавных полосах частот вместо анализа в октавных полосах); увеличение числа направлений, в которых проводятся замеры величины спада уровня звукового давления (с расстоянием), и числа точек измерения по каждому из направлений, а также использование в качестве источника звука тонального сигнала вместо широкополосного шума. Согласно [4], аттестационные испытания проводились в диапазоне частот от 160 Гц до 20 кГц. Таким образом, нет каких-либо принципиальных различий между аттестационными методиками, приведёнными в двух стандартах ([4] и [1]).

Как отмечено в [5], обе методики, установленные стандартами [1, 4], могут использоваться для аттестации камер в диапазоне частот с нижней граничной частотой 100 Гц. В то же время, в соответствии со стандартом ISO 26101-2102, камера может быть аттестована и в более узком диапазоне частот. Согласно [5], в настоящее время проводятся рабо-

ты по доработке методики аттестации камер, причём речь идёт о переработке методик квалификации акустического поля в камере, изложенных в обоих стандартах (ISO 3745-2014 и ISO 26101-2102).

Следует отметить, что в действующих методиках, используемых при проведении аттестации акустических камер [1, 3, 4], не учитываются специфические особенности аттестационных акустических измерений в низкочастотном диапазоне (в особенности, в диапазоне частот $f \leq 100$ Гц, когда измерительная поверхность расположена в ближней зоне акустического поля). Кроме того, в этих методиках не учитывается влияние на результаты измерений чисто реактивного поля стоячих звуковых волн, формирующегося в низкочастотном диапазоне на первых собственных частотах объёма камеры.

В то же время, в соответствии с некоторыми отраслевыми методиками, при аттестации акустической камеры предусмотрено проведение измерений в низкочастотном диапазоне (начиная с 1/3-октавной полосы со среднегеометрической частотой 31,5 Гц).

Как известно, проведение акустических измерений в низкочастотной области (в особенности, в диапазоне частот: $f \leq 100$ Гц) сопряжено с существенными трудностями, обусловленными неоднородной структурой комплексного акустического поля, формирующегося при работе образцового источника шума, а также влиянием помещения на результаты измерений. Согласно [6], наиболее интенсивные моды собственных колебаний объёма камеры (на первых собственных частотах) обычно возбуждаются в диапазоне частот от 20 до 200 Гц. Поэтому в низкочастотном диапазоне (особенно ниже 100 Гц) при измерении акустических характеристик машин существенно возрастают систематические погрешности, обусловленные влиянием помещения [6].

Эти погрешности существенно превышают предельно допустимые значения, установленные в стандарте [1], поэтому, как правило, акустическая камера не может быть аттестована в диапазоне самых низких частот (ниже 100 Гц). В результате возбуждения собственных мод помещения на его первых собственных частотах (ниже 100 Гц) в объёме камеры формируется реактивное поле стоячих звуковых волн. Это чисто реактивное поле оказывает существенное влияние на результаты низкочастотных измерений акустических характеристик машин в заглушённой камере.

Кроме того, при небольших размерах акустической камеры, на самых низких частотах (ниже 100 Гц) измерительную поверхность приходится размещать в ближней зоне акустического поля. В ближней зоне поля систематическая погрешность измерений

обусловлена существенной неоднородностью структуры комплексного акустического поля. Согласно [6, 7], в ближней зоне акустического поля скорость спада интенсивности звука (с расстоянием) существенно превышает скорость спада интенсивности звука в дальней зоне акустического поля (т. е. в свободном звуковом поле). Таким образом, при проведении измерений в ближней зоне поля закон инверсии не выполняется, поэтому, в соответствии с действующими методиками [1, 4], камера не может быть аттестована в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц), в котором измерения проводятся в ближней зоне звукового поля.

Поэтому для проведения корректных аттестационных испытаний камеры в низкочастотном диапазоне должна быть проведена предварительная оценка степени влияния систематических погрешностей на результаты измерений акустических характеристик испытываемых машин.

В данной работе рассмотрены метрологические проблемы, связанные с определением систематических погрешностей измерений при проведении аттестации сравнительно небольших заглушённых камер в низкочастотном диапазоне. Для исследования характеристик комплексного акустического поля (формирующегося при работе источника звука) в ближней зоне (как гидродинамической, так и геометрической), а также чисто реактивного поля стоячих звуковых волн, формирующегося в объёме камеры на её первых собственных частотах, был использован метод акустической интенсивности.

При проведении аттестационных испытаний акустической камеры в качестве образцового источника звука часто используются источники аэродинамического шума (в частности, эталонный источник шума [Reference sound source] типа 4204, производства фирмы «Брюль и Кьер», Дания). При проведении аттестации полузаглушённой акустической камеры в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» был использован аналогичный по конструкции источник аэродинамического шума (типа ОИШ-МВ-1).

Образцовый источник шума типа ОИШ-МВ-1 выполнен на базе серийного отечественного вентилятора типа ВЦ-14-46-2,5, аэродинамический шум генерируется при прохождении воздушного потока через межлопаточные каналы рабочего колеса этого вентилятора с 32 загнутыми вперёд лопатками (диаметр колеса – 0,3 м, частота вращения – 3000 1/мин).

1. Формирование комплексного акустического поля образцового источника шума

Механизмы возбуждения и формирования активного и реактивного акустических полей в

межлопаточных каналах колеса более подробно рассмотрены в работах [8, 9]. В кратком изложении вихреобразование и возбуждение неоднородных акустических волн в межлопаточных каналах колеса обусловлены следующими физическими процессами.

При прохождении воздушного потока через межлопаточные каналы колеса генерация аэродинамического шума обусловлена процессами вихреобразования в межлопаточных каналах колеса вследствие отрыва пограничного слоя от поверхности лопатки. Во вращающихся межлопаточных каналах, вследствие вязкости среды, течение в пограничном слое замедляется (тормозится). Замедление течения обусловлено также поворотом потока на 90° (при прохождении потока через колесо) и расширением канала, имеющего форму диффузора, в направлении течения. Причём степень торможения потока в канале зависит от формы лопаток и, в частности, максимальное торможение потока (и максимальный размер зон отрыва потока) зафиксировано в межлопаточных каналах колеса с лопатками, загнутыми вперёд.

Замедление вязкого течения в каналах колеса приводит к появлению зон отрыва пограничного слоя (отрыва потока). Отрыв потока в межлопаточных каналах обусловлен [10] торможением течения в канале, поскольку, в соответствии с принципом Бернулли, торможение течения сопровождается возрастанием давления в направлении течения (при этом градиент давления становится положительным). Когда вся кинетическая энергия частиц воздуха в пограничном слое трансформируется в энергию вязких потерь, на поверхности лопатки градиент компоненты скорости течения (u_y), направленной вдоль оси, перпендикулярной к этой поверхности, становится равным нулю: $(\partial u_y / \partial y)|_{y=0} = 0$. В пограничном слое (и в основном потоке) градиент тангенциальной компоненты скорости течения ($\partial u_x / \partial x$) в направлении течения становится отрицательным, а градиент нормальной скорости течения ($\partial u_y / \partial y$) до точки отрыва положителен. Таким образом, скорость течения на поверхности лопатки минимальна, а на внешней поверхности пограничного слоя равна скорости основного течения. Поскольку вследствие торможения потока градиент давления в направлении течения ($\partial p / \partial x$) становится положительным, то за точкой отрыва пограничного слоя течение отходит от поверхности канала [11].

В соответствии с классической теорией отрывных течений [10], в точке отрыва пограничного слоя градиент скорости вдоль нормали к поверхности лопатки становится равным 0 (при положительном градиенте давления в направлении тече-

ния). За точкой отрыва в пограничном слое, благодаря положительному градиенту давления, создаётся перепад давлений и, вследствие этого, образуется «возвратное» течение, направленное против основного течения. В «возвратном» течении скорость и градиент скорости вдоль нормали к поверхности лопатки принимают отрицательные значения [10].

В то же время в основном течении градиент скорости по нормали к стенке канала положителен и, следовательно, профиль скорости течения за точкой отрыва течения имеет точку перегиба. Возникновение возвратного течения приводит к существенному увеличению толщины пограничного слоя. При наличии в профиле скорости течения точки перегиба течение становится неустойчивым и имеет тенденцию к турбулизации [10]. В пограничном слое, вследствие неустойчивости течения, образуются вихри. Таким образом, отрыв пограничного слоя от поверхности лопатки сопровождается интенсивным вихреобразованием и сходом вихрей с поверхности лопатки.

Вихреобразование приводит к возбуждению на поверхности лопатки пульсаций давления, обусловленных воздействием на лопатку пульсационной силы. В момент схода вихрей с поверхности лопатки изменяется циркуляция потока около поверхности лопатки. Возбуждение циркуляционной силы F_{pul} , амплитуда которой зависит от параметров циркуляции в вихре [11], обусловлено изменением циркуляции на поверхности лопатки. Величина циркуляции вихря пропорциональна модулю вектора угловой скорости вращения частиц среды $\omega_{вр}$.

Таким образом, при образовании и сходе вихрей с поверхности лопатки возбуждаются пульсационные силы и пульсации давления. В качестве модели пульсационных сил, распределённых по поверхности лопатки, используются акустические диполи. Пульсации давления являются источниками широкополосного «вихревого» шума со сплошным спектром [11]. Турбулизация потока (на входе в колесо) обусловлена тем, что в качестве источника шума (типа ОИШ-МВ-1) использовано «свободное» колесо без спирального корпуса. Обычно в радиальном вентиляторе турбулизация потока на входе в колесо минимизируется благодаря плавному входу потока в колесо через входной коллектор, закреплённый в стенке спирального корпуса вентилятора.

Согласно [8, 9, 11], возбуждение широкополосного шума может быть обусловлено несколькими физическими механизмами: начальной турбулентностью потока на входе в колесо; вихреобразованием в потоке при срыве потока в межлопаточных каналах колеса и сходом вихрей с задних кромок

лопаток («вихревой» шум). Кроме того, шум пограничного слоя возбуждается пульсациями давления в турбулентном пограничном слое, который формируется около обтекаемой потоком поверхности лопатки, а турбулентный шум возбуждается пульсациями давления в турбулентной струе.

Формированием значительных (по размеру) зон отрыва потока в межлопаточных каналах колеса обусловлена высокая эффективность как вихреобразования в потоке, так и последующей генерации широкополосного «вихревого» шума. Широкополосный «вихревой» шум (с гладким спектром) генерируется вихрями, которые распространяются вместе с потоком. Таким образом, в дальней зоне акустического поля (на выходе из межлопаточных каналов колеса) формируется активная компонента комплексного акустического поля.

В то же время при отрыве пограничного слоя около поверхности лопатки формируется дополнительное поле гидродинамических пульсаций давления, которые по своей физической природе принципиально отличны от звуковых пульсаций давления. Как отмечено выше, энергия звуковых пульсаций давления трансформируется в энергию звуковых волн, которые излучаются при истечении турбулентного потока из межлопаточных каналов (в дальней зоне акустического поля). Энергия гидродинамических пульсаций давления не может трансформироваться в энергию упругих (звуковых) волн, поскольку поле гидродинамических пульсаций давления, формирующееся около поверхности лопатки, является чисто реактивным полем.

Таким образом, процесс вихреобразования в межлопаточных каналах сопровождается формированием дополнительного чисто реактивного поля гидродинамических (или псевдозвуковых) пульсаций давления, причём энергия поля псевдозвуковых пульсаций давления не может трансформироваться в энергию звуковых волн. Согласно [12], для описания поля псевдозвуковых пульсаций давления, в отличие от поля звуковых пульсаций давления (звуковых волн), не может быть использовано волновое уравнение, поскольку воздушная среда ведёт себя как несжимаемая среда. В несжимаемой среде процесс формирования поля гидродинамических пульсаций давления описывается с помощью уравнения Лапласа (вместо уравнения Гельмгольца).

Процесс перемещения вихревых структур в турбулентном потоке квалифицируется как процесс формирования поля псевдозвуковых пульсаций давления, поскольку скорость перемещения этих структур значительно меньше скорости распространения звуковых волн. В результате пере-

мещения вихрей в турбулентном потоке формируется реактивное поле гидродинамических (псевдозвуковых) пульсаций давления [12] в виде распределения гидродинамических давлений. Это реактивное поле локализовано преимущественно в объёме турбулентного потока [12] (а именно в каждом межлопаточном канале колеса и непосредственно на выходе из канала).

Согласно [10, 12, 13], в соответствии с теорией отрывных течений, в межлопаточных каналах источника звука (типа ОИШ-МВ-1) формируются два поля пульсаций давления с принципиально различной физической природой. А именно поле звуковых пульсаций давления, энергия которого трансформируется в энергию активного поля звуковых волн, и поле псевдозвуковых пульсаций давления, энергия которого трансформируется в энергию чисто реактивного поля неоднородных акустических волн. Таким образом, в камере формируется комплексное акустическое поле источника звука типа ОИШ-МВ-1. Кроме того, при возбуждении первых собственных мод объёма камеры на собственных частотах формируется чисто реактивное поле стоячих звуковых волн.

Согласно [13], при проведении измерений в ближней зоне поля в низкочастотном диапазоне, оба поля (и звуковых и псевдозвуковых пульсаций давления) оказывают практически одинаковое динамическое воздействие на мембрану измерительного микрофона. Невозможно измерить по отдельности акустическую характеристику каждого из этих двух полей. Поэтому, при измерении уровней звукового давления можно определить только суммарную характеристику комплексного акустического поля.

В то же время, согласно [14], при проведении интенсивметрических измерений результаты измерения уровней звукового давления в двух точках акустического поля (с помощью двухмикрофонного зонда) используются для вычисления уровней как активной, так и реактивной компонент интенсивности звука в комплексном акустическом поле. Причём амплитуда активной компоненты интенсивности звука пропорциональна градиенту фазы, а амплитуда реактивной компоненты интенсивности звука пропорциональна градиенту давления (в комплексном акустическом поле). Для вычисления значений активной $\vec{I}_{act}(\omega)$ и реактивной $\vec{J}_{react}(\omega)$ компонент интенсивности звука используются известные выражения [14]:

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

$$\vec{J}_{react}(\omega) = -P \nabla P / (2\rho_0 \omega), \quad (3)$$

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 можно определить все характеристики комплексного акустического поля (с разделением активной и реактивной компонент поля) в ближней зоне источника звука типа ОИШ-МВ-1.

В соответствии с изложенным, с помощью интенсивметрических измерений можно получить важную дополнительную информацию о характеристиках комплексного акустического поля в ближней зоне источника звука. Как отмечено выше, согласно [13, 14], в ближней зоне акустического поля при измерении уровней звукового давления звука в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц) микрофон не может разделить активную и реактивную компоненты поля. Поэтому с помощью микрофона измеряется суммарный уровень звукового давления в двух акустических полях, формирующихся 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 звуковых волн.

В то же время с помощью интенсивметрических измерений можно разделить эти две компоненты поля (активную и реактивную) с учётом различий в физическом механизме генерации двух типов пульсаций давления (звуковых и псевдозвуковых). В поле звуковых пульсаций давления частицы среды перемещаются со скоростью, равной скорости звука, а в поле псевдозвуковых пульсаций давления среда ведёт себя как несжимаемая, поэтому скорость распространения псевдозвуковых пульсаций давления определяется только скоростью их переноса (конвекции) турбулентным потоком [12].

Согласно [13], в поле звуковых пульсаций давления амплитуда давления пропорциональна $\rho c_0 u$, а в поле псевдозвуковых пульсаций давления – амплитуда давления не зависит от скорости звука и пропорциональна ρu^2 , где ρ – плотность среды; u – колебательная скорость частиц среды; c_0 – скорость звука в воздухе. В несжимаемой среде колебательное давление связано с колебатель-

ной скоростью уравнением Пуассона, поэтому псевдозвуковые пульсации давления называют также гидродинамическими пульсациями давления [13].

В соответствии с [13, 14], при проведении интенсивметрических измерений в ближней зоне поля можно определить, по отдельности, характеристики активной и реактивной компонент комплексного акустического поля, формирующегося при работе источника звука типа ОИШ-МВ-1.

Для проведения корректных аттестационных испытаний камеры в низкочастотном диапазоне (в особенности, ниже 100 Гц) необходимо учитывать влияние на результаты акустических измерений как активной компоненты акустического поля (поля звуковых волн), так и реактивных акустических полей. Т. е., помимо поля звуковых волн, также должно быть учтено влияние реактивной компоненты комплексного поля источника звука (а именно поля неоднородных звуковых волн, которое формируется в ближней зоне источника звука, вследствие возбуждения псевдозвуковых пульсаций давления). Кроме того, необходимо учесть влияние чисто реактивного поля стоячих звуковых волн, формирующегося на первых собственных частотах объема камеры, поскольку это поле занимает весь объем камеры (стоячие волны распределены по всему замкнутому объему).



Рис. 1. Экспериментальная установка для проведения аттестационных интенсивметрических измерений в акустической камере АО «Корпорация «ВНИИЭМ»: 1 – двухмикрофонный интенсивметрический зонд производства фирмы «G.R.A.S Sound&Vibration» (с ветрозащитной насадкой); 2 – образцовый источник звука типа ОИШ-МВ-1 (на полу камеры отмечено положение измерительных поверхностей)

2. Методические основы применения метода акустической интенсивметрии для классификации акустического поля, формирующегося в акустической камере

Как отмечено выше, для проведения аттестационных испытаний камеры необходимо измерить акустические характеристики комплексного акустического поля, которое формируется в объеме камеры. В то же время для отдельного определения характеристик двух составляющих (как активной, так и чисто реактивной) комплексного акустического поля может быть использован только метод акустической интенсивметрии.

Для проведения интенсивметрических измерений, в соответствии со стандартом [15] был использован 4-канальный анализатор типа «Scadas Mobile» (производство фирмы «LMS Siemens Business») с двухмикрофонным интенсивметрическим зондом 50AI-L (производство фирмы «G.R.A.S Sound&Vibration»). Расстояние между двумя микрофонами в зонде фиксируется с помощью специальной проставки, причём частотный диапазон интенсивметрических измерений зависит от расстояния между микрофонами.

Образцовый источник шума (типа ОИШ-МВ-1) был установлен в центре полузаглушенной акустической камеры (со звукоотражающим полом). Габаритные размеры свободного объема камеры $8,0 \times 10,0 \times 5,0$ м, толщина звукопоглощающего покрытия – 0,35 м. Экспериментальная установка представлена на рис. 1.

Дополнительные низкочастотные интенсивметрические измерения проводились в измерительном помещении с жесткими ограждающими поверхностями, габаритные размеры этого помещения равны: $7,0 \times 6,0 \times 11,0$ м.

Методикой аттестационных измерений предусмотрено измерение акустических характеристик комплексного акустического поля на двух измерительных поверхностях (в виде прямоугольного параллелепипеда) с габаритными размерами, соответственно, $1,0 \times 1,0 \times 1,0$ м (измерительная поверхность № 1) и $2,0 \times 2,0 \times 2,0$ м (измерительная поверхность № 2). На каждой грани измерительной поверхности (параллелепипеда) измерения проводились в 6 точках измерения, а затем вычислялось усредненное значение уровней интенсивности звука (для каждой грани параллелепипеда и для всей измерительной поверхности).

Для разделения активной и реактивной компонент комплексного акустического поля в программном обеспечении анализатора типа «Scadas Mobile» предусмотрена возможность отдельного

вычисления этих двух компонент. При этом, согласно [14], для вычисления активной $\vec{I}_{act}(\omega)$ и реактивной $\vec{J}_{react}(\omega)$ компонент интенсивности звука в программном обеспечении используются известные выражения (2 и 3).

Кроме того, методикой предусмотрено вычисление (на основании результатов измерений давления и программного обеспечения) значения критерияльного индекса «давление – интенсивность», расчётная формула приведена, в частности, в стандарте [15]. Этот индекс (который обозначают как $[F_2]$ или $[F_{pl}]$) называют также критерием или индикатором поля, поскольку именно индекс F_{pl} позволяет оценить степень диффузности («реактивности») акустического поля. Именно с помощью этого индекса обеспечивается возможность дифференциации акустических полей с различной физической природой: т. е. активных и реактивных полей. В чисто свободном акустическом поле величина индекса F_{pl} близка к 0, а в чисто диффузном (реактивном) поле значения индекса максимальны и могут превысить 10 дБ.

Таким образом, именно на основании результатов интенсивметрических измерений может быть осуществлена корректная классификация акустического поля, формирующегося в камере при работе источника звука (например, типа ОИШ-МВ-1). На основании такой квалификации акустических полей осуществляется метрологическая дифференциация заглушённых акустических камер, которые могут предназначаться для проведения акустических измерений точным методом (в свободном акустическом поле) либо техническим методом (в существенно свободном акустическом поле).

3. Результаты аттестационных интенсивметрических измерений в акустической камере, используемой для испытаний изделий в АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

3.1. Анализ метрологических проблем, возникающих при использовании современных методик аттестации камеры в низкочастотном диапазоне. В соответствии с методикой, включённой в «Приложение А» к стандарту ISO 3745 [1, 3], на основании результатов аттестационных испытаний заглушённых (или полузаглушённых) акустических камер должно быть установлено, что акустическое поле, формирующееся в камере, квалифицируется как свободное (либо существенно свободное) акустическое поле. В свободном звуковом поле величина спадаения уровней звукового давления (по мере удаления измерительной поверхности от источ-

ника звука) определяется «законом инверсии» [1, 3]. При этом, в соответствии с результатами успешных аттестационных испытаний, помещение (акустическая камера) не должно оказывать практически никакого влияния на характеристики акустического поля, формирующегося в камере при работе образцового источника шума.

Наряду с этой методикой [1, 3], в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» при проведении акустических испытаний двигателей специального назначения, предназначенных для судостроительной промышленности, вместо государственных стандартов [1, 2], используются отраслевые методики измерений. В соответствии с этими методиками в качестве акустической характеристики электродвигателя вместо спектра звуковой мощности используется спектр звукового давления. Причём при проведении испытаний, в соответствии с ТУ (техническими условиями) на электродвигатель, звуковое давление должно быть измерено в фиксированной точке измерения (на измерительной поверхности). Расстояние от источника звука до точки измерения не должно превышать 1 м. Причём этими отраслевыми методиками предусмотрено измерение уровней звукового давления (в рамках программы испытаний электродвигателей) в низкочастотном диапазоне (а именно, начиная с 1/3-октавной полосы со среднегеометрической частотой 31,5 Гц). В этом случае при проведении аттестации в качестве критерия, на основании которого камера квалифицируется как помещение, пригодное для акустических испытаний изделий (судовых машин), используются либо всё тот же «закон инверсии» (1) либо величина эквивалентной площади поглощения звуковых волн (не менее 200 м²).

При проведении аттестационных испытаний, в соответствии со стандартом [1], измерения могут проводиться практически на любом расстоянии от источника звука (это расстояние ограничено только габаритными размерами камеры), поскольку результаты измерения звуковой мощности никак не зависят от расстояния между источником звука и точкой измерения (паспортная мощность звука является константой для каждого изделия).

В то же время при измерении звукового давления (в соответствии с отраслевыми методиками, используемыми в судостроении) точка измерения жёстко зафиксирована (и в методике, и в ТУ на изделие), поэтому расстояние между источником звука и микрофоном в принципе никак не может быть увеличено. Таким образом, в низкочастотном диапазоне (до 100 Гц) измерения, в соответствии с ТУ, могут проводиться только в ближней зоне аку-

стического поля, так как размер ближней зоны, который равен длине звуковой волны, значительно превосходит расстояние $r_{\text{изм}}$ от изделия до точки измерения ($r_{\text{изм}} \leq 1$ м).

В соответствии с изложенным, в отраслевой методике содержится принципиальное внутреннее противоречие, которое полностью исключает возможность выполнения требований этой методики в низкочастотном диапазоне (в особенности, когда $f \leq 100$ Гц). Следует отметить, что методика аттестационных испытаний, включённая в стандарт [1] (приложение А), также не может быть использована в инженерной практике в случае, когда, в соответствии с нормативными документами, аттестация должна проводиться в низкочастотном диапазоне. Т. е., если диапазон частот, в котором должна проводиться аттестация, включает в себя и низкие частоты (а именно $f \leq 100$ Гц), стандартная методика не может быть применена. В этом случае следует ограничить диапазон частот, в котором проводится аттестация, исключив из него низкие частоты (начиная со 100 Гц).

Таким образом, действующие методики, которые используются в настоящее время для метрологической аттестации заглушённых акустических камер, в действительности не могут быть использованы для аттестации камеры в низкочастотном диапазоне. На низких частотах с помощью этих методик невозможно корректно определить характеристики акустического поля, формирующегося в камере. Поэтому в рамках данной работы были проведены экспериментальные исследования эффективности применения альтернативной методики метрологической аттестации заглушённых акустических камер. Эта методика основывается на использовании для акустических измерений метода акустической интенсиметрии, причём исследования проводились, преимущественно, именно в низкочастотном диапазоне.

Дело в том, что в низкочастотном диапазоне измерения проводятся исключительно в ближней зоне акустического поля, формирующегося в объёме камеры при работе изделия (источника звука). Как отмечено выше, акустическое поле источника звука специалисты подразделяют на 2 зоны с принципиально различной физической природой: ближнюю зону и дальнюю зону. Ближняя зона, в свою очередь, подразделяется на гидродинамическую ближнюю зону и геометрическую ближнюю зону. Звуковые волны возбуждаются только в дальней зоне поля, а в ближней зоне формируются акустические поля пульсаций давления: гидродинамических либо звуковых пульсаций (соответ-

ственно, в гидродинамической либо геометрической ближней зоне поля). Причём пульсации давления по своей природе принципиально отличны от звуковых волн.

Согласно [7, 16, 17], для расстояния r_d от источника звука до границы дальней зоны акустического поля должны выполняться следующие соотношения:

$$\begin{aligned} r_d &\geq 3 \lambda_{\text{зв}} / (2\pi); \\ r_d &\geq 3L_m; \\ r_d &\geq 3\pi \cdot L_m / (2\lambda_{\text{зв}}), \end{aligned} \quad (4)$$

где L_m – максимальный размер источника звука; $\lambda_{\text{зв}}$ – длина волны звука.

Следует отметить, что, согласно [16], между ближней и дальней зонами акустического поля всегда расположена «переходная» зона, поэтому величина расстояния r_d складывается из размеров ближней и переходной зон. На практике для определения минимально возможного значения этого расстояния (r_d) используется следующее соотношение: $r_d \geq \lambda_{\text{зв}}$. В то же время максимальный размер геометрической ближней зоны поля, согласно [16, 17], не превышает $\lambda_{\text{зв}}$, а, кроме того, не превышает $5L_m$.

В частности, на частоте 100 Гц длина волны $\lambda_{\text{зв}} = 3,4$ м, а точка измерения, согласно ТУ, расположена на расстоянии 1 м от изделия, т. е. примерно на расстоянии $\lambda_{\text{зв}}/4$ от источника звука. Кроме того, в соответствии с [7], размер геометрической ближней зоны источника звука (типа ОИШ-МВ-1) не превышает 1,5 м ($5L_m$).

Следовательно, при проведении аттестационных измерений в низкочастотном диапазоне ($f \leq 100$ Гц), в соответствии с отраслевой Методикой, измерительная поверхность расположена исключительно в ближней зоне акустического поля.

Однако, как отмечено выше, в соответствии с теорией акустического излучения [7, 12, 13], в ближней зоне изделия (источника звука) формируется поле звуковых и гидродинамических (псевдозвуковых) пульсаций давления. В то же время, поле звуковых волн формируется в дальней зоне акустического поля. При этом акустическая энергия поля звуковых пульсаций давления передаётся из ближней зоны в дальнюю зону поля, в которой энергия пульсаций давления трансформируется в энергию поля звуковых волн. В соответствии с изложенным, свободное (или существенно свободное) акустическое поле (структура которого соответствует «закону инверсии») может сформироваться только в дальней зоне акустического поля.

Таким образом, при проведении акустических испытаний электродвигателей специального назначения (применяемых, в частности, в судостроении) в низкочастотном диапазоне (на частотах: $f \leq 100$ Гц) требования отраслевой методики не могут быть исполнены в принципе. При проведении метрологической аттестации камеры отраслевые документы (в частности, отраслевая методика измерений и ТУ на изделие) не могут использоваться в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц), поскольку на этих частотах (т. е. в ближней зоне акустического поля источника звука) формируется поле пульсаций давления (звуковых и псевдозвуковых) вместо поля звуковых волн.

В то же время свободное звуковое поле, о котором идёт речь в отраслевой методике измерений, может сформироваться только в дальней зоне акустического поля. Однако в диапазоне низких частот (ниже 100 Гц) измерительная поверхность расположена в ближней зоне акустического поля, в которой, в соответствии с требованиями стандартов [1, 2], принципиально недопустимо проведение измерений уровней звукового давления. Поэтому при аттестации камеры частотный диапазон, в котором проводятся измерения, должен быть ограничен за счёт исключения из него низкочастотных измерений (а именно измерений в 1/3-октавах со среднегеометрическими частотами от 31,5 до 100 Гц).

Таким образом, на основании анализа физических процессов, которыми обусловлено формирование комплексного акустического поля источника звука (изделия), испытываемого в камере, установлены принципиальные ограничения, накладываемые на частотный диапазон, в котором испытания могут проводиться в соответствии с отраслевыми документами (а именно методикой измерений и ТУ на изделие).

На основании отраслевой методики аттестационные испытания могут проводиться только в частотном диапазоне, в котором измерительная поверхность расположена в свободном (или «существенно свободном») акустическом поле. Как отмечено выше, «закон инверсии» (1) выполняется только в свободном поле. В то же время, свободное поле может сформироваться только в дальней зоне поля, причём расстояние от источника звука до границы дальней зоны (r_{far}) превышает длину звуковой волны: $r_{far} \geq \lambda_{зв}$.

Следовательно, размер измерительной поверхности, с одной стороны, должен превышать длину звуковой волны, а с другой стороны, измерительная поверхность (и в частности, точки измерения, в которых с помощью микрофона должны быть из-

мерены уровни звукового давления), в соответствии с ТУ, должна располагаться на расстоянии не более 1 м от источника звука (изделия). В низкочастотном диапазоне (когда $f \leq 100$ Гц) длина волны звука превышает 3,4 м и, следовательно, измерительная поверхность в этом случае расположена исключительно в ближней зоне комплексного акустического поля.

Таким образом, в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц) невозможно провести испытания электродвигателей специального назначения в соответствии с требованиями, сформулированными в отраслевой методике испытаний и в ТУ на изделие. В ближней зоне акустического поля невозможно провести корректные измерения уровней звукового давления. В то же время на низких частотах, в соответствии с требованиями методики и ТУ, измерительная поверхность должна располагаться именно в ближней зоне поля.

Проведение аттестации камеры в соответствии с методикой, представленной в стандарте [1, 3] (для проведения испытаний общепромышленных электродвигателей), в низкочастотном диапазоне также сопряжено с существенными сложностями. Хотя, в соответствии с этой методикой, для расстояния между источником звука и измерительной поверхностью не установлены жёсткие ограничения (как в отраслевой методике), на самых низких частотах (в особенности, ниже 63 Гц) длина звуковой волны превышает 5,4 м. Таким образом, размер ближней зоны превышает 5 м и, следовательно, на практике измерения могут проводиться только в ближней зоне поля. Поскольку в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» габаритные размеры камеры составляют $8,0 \times 10,0 \times 5,0$ м, невозможно проводить измерения на измерительной поверхности с габаритными размерами, которые превышают 5,4 м (т. е. в дальней зоне поля). В то же время, в соответствии с требованиями стандарта [1, 3], измерения могут проводиться только в дальней зоне акустического поля, в которой формируется свободное акустическое поле.

Кроме того, в низкочастотном диапазоне невозможно отличить активную компоненту комплексного акустического поля от реактивной компоненты поля. Причём, как было отмечено выше, на низких частотах интенсивность реактивной компоненты выше интенсивности активной компоненты поля. Помимо реактивного поля источника звука в объёме камеры возбуждается весьма интенсивное чисто реактивное поле стоячих звуковых волн (на первых собственных частотах камеры). Следует также отметить, что, согласно [13], при измерении уровней звукового давления в комплексном аку-

стическом поле невозможно отличить активную компоненту поля от чисто реактивного поля стоячих звуковых волн, поскольку на самых низких частотах активная и реактивная компоненты комплексного акустического поля (поля пульсаций давления) оказывают практически одинаковое динамическое воздействие на мембрану микрофона.

В то же время, в соответствии с изложенным, при использовании метода акустической интенсивности можно определить акустические характеристики как активного, так и реактивного акустического поля. На основании результатов интенсивметрических измерений, проведённых на измерительной поверхности, с помощью выражений (2 и 3) вычисляются, соответственно, значения и активной и реактивной компоненты интенсивности звука. Следовательно, при использовании метода акустической интенсивности можно измерить характеристики как активного, так и реактивного акустических полей. С помощью интенсивметрических измерений обеспечивается возможность получения важной дополнительной информации об акустических характеристиках обеих компонент комплексного акустического поля. Причём, в низкочастотном диапазоне, только с помощью интенсивности можно разделить активную и реактивную компоненты поля и определить (в результате измерений и вычислений) уровни интенсивности звука в активном акустическом поле, формирующемся в камере при работе источника звука типа ОИШ-МВ-1.

В соответствии с [18, 19], в ближней зоне акустического поля, формирующегося при работе элементарных мультипольных источников звука (а именно источников типа «диполя» и «монополя»), скорость спадания уровней колебательной скорости (и, соответственно, уровней интенсивности звука) существенно больше, чем в дальней зоне акустического поля (в которой действует «закон инверсии»). Согласно [18], в результате решения волнового уравнения для точечных источников звука типа «монополя» (т. е. пульсирующей сферы) установлено, что значения колебательного давления p и колебательной скорости частиц среды u в акустическом поле, которое формируется при работе источника звука (типа монополя), вычисляются с помощью выражений:

$$p = [\rho c k Q / (4\pi r_n)] \cdot \sin(\omega \cdot t - kr_n + \varphi_1), \quad (5)$$

$$u = [ck^2 Q / (\omega 4\pi r_n)] \cdot \sin(\omega \cdot t - kr_n + \varphi_1) - [ck Q / (\omega 4\pi r_n^2)] \cos(\omega \cdot t - kr_n + \varphi_1), \quad (6)$$

где $Q = 4\pi A_1 / (\rho c k)$, величина Q является силовой характеристикой источника звука; A_1 – амплитуда звукового давления в акустическом поле; k – волновое число; φ_1 – фазовый угол; t – время; r_n – расстояние от источника звука до точки измерения. Значения u и p связаны между собой соотношением: $(-\partial p / \partial r) = \rho \partial u / \partial t$.

Анализ выражений (5) и (6) показывает, что на больших расстояниях r_n от источника звука (т. е. в дальней зоне акустического поля) сдвиг фаз между колебательной скоростью и колебательным давлением практически равен 0. При этом в выражении (6) доминирует первый член, по сравнению с которым второй член пренебрежимо мал. Поэтому в дальней зоне акустического поля (для больших значений расстояния r_n) скорость спадания уровней колебательной скорости с расстоянием (по мере удаления точки измерения от источника звука) соответствует «закону инверсии»: $u \propto 1/r_n$.

В то же время на небольших расстояниях от источника звука (в ближней зоне акустического поля) в выражении (6) доминирует второй член, по сравнению с которым первый член пренебрежимо мал. Как известно, в ближней зоне поля сдвиг фаз между колебательной скоростью и колебательным давлением близок к значению $(\pi/2)$, при этом скорость спадания уровней колебательной скорости с расстоянием (т. е. по мере удаления точки измерения от источника звука) существенно возрастает по сравнению с «закон инверсии». Как отмечено выше, «закон инверсии» соответствует скорости спадания уровней колебательной скорости в дальней зоне поля, а в ближней зоне для описания скорости спадания уровней колебательной скорости с расстоянием используется следующая зависимость [18]:

$$u \propto 1/r_n^2. \quad (7, a)$$

Для источника звука типа акустического «диполя» (т. е. осциллирующей сферы), согласно [18], значения колебательной скорости частиц среды u и давления p вычисляются с помощью выражений, аналогичных выражениям (5) и (6). В ближней зоне поля акустического диполя скорость спадания уровней $(\Delta L_p)_N$ давления p , согласно [18], существенно больше, чем в дальней зоне:

$$p \propto 1/r_n^2. \quad (7, б)$$

Таким образом, в ближней зоне поля, которое формируется при работе источника звука типа монополя, скорость спадания уровней колебательной

скорости с расстоянием (по мере увеличения расстояния от источника звука до точки измерения) существенно больше, чем в дальней зоне поля. А именно, при удвоении расстояния от источника типа монополя до точки измерения уровни скорости спадают на величину $(\Delta L_n)_N$: $(\Delta L_n)_N = 40 \lg(r_2/r_1) = 40 \lg 2 = 12$ дБ. Таким образом, согласно результатам расчётов (выполненных в соответствии с [18]), для ближней зоны поля, формирующегося вследствие акустического излучения источника типа монополя, скорость спадания уровней колебательной скорости с расстоянием $[(\Delta L_n)_N]$ больше на $20 \lg(r_2/r_1) = 20 \lg 2$ (т. е. на 6 дБ), по сравнению с расчётным значением скорости спадания уровней колебательной скорости в дальней зоне поля (которое классифицируется как свободное).

Аналогичным образом в ближней зоне поля, которое формируется в результате излучения звука источником типа акустического диполя, в соответствии с выражением (7, б), скорость спадания уровня давления (при увеличении расстояния от источника звука) значительно больше, чем в дальней зоне поля. В ближней зоне при удвоении расстояния от источника звука типа диполя до точки измерения величина спадания уровня давления, также как и для монополя, равна 12 дБ (т. е. на 6 дБ больше, чем в дальней зоне поля).

В соответствии с [18], в дальней зоне акустического поля, которое формируется в результате излучения звуковых волн источником типа монополя, интенсивность звука пропорциональна усреднённому значению квадрата колебательной скорости. С помощью вектора интенсивности звука описывается процесс распространения потока акустической энергии (т. е. активной компоненты интенсивности звука) через измерительную поверхность. Однако в ближней зоне поля акустическая интенсивность монополя, в отличие от дальней зоны, уже не пропорциональна усреднённому значению $\langle u^2 \rangle$.

В то же время, в ближней зоне комплексного акустического поля интенсивность звука пропорциональна произведению усреднённых значений звукового давления и колебательной скорости. При этом реактивная компонента интенсивности звука пропорциональна произведению комплексного значения давления и комплексно сопряжённого значения колебательной скорости [20]. Как отмечено выше, в ближней зоне, помимо активного поля звуковых пульсаций давления, формируется чисто реактивное поле гидродинамических (т. е. псевдозвуковых) пульсаций давления. В этом реактивном поле акустическая энергия не распространяется,

поток акустической энергии отсутствует, а энергия сконцентрирована около источника звука в поле псевдозвуковых пульсаций давления. В отличие от дальней зоны, в которой распространяются сферические или цилиндрические звуковые волны, в ближней зоне «закон инверсии» не может использоваться для описания процесса распространения потока акустической энергии, которая генерируется образцовым источником звука (типа ОИШ-МВ-1). В ближней зоне в принципе не может сформироваться свободное акустическое поле, в котором распространяются сферические звуковые волны, поэтому «закон инверсии» в этой зоне не действует.

Величина интенсивности звука в ближней зоне акустического поля вычисляется как произведение величин колебательного давления и колебательной скорости частиц среды. При этом, скорость спадания уровней активной компоненты интенсивности звука (по мере удаления точки измерения от источника звука) в ближней зоне акустического поля вычисляется с помощью выражения: $\Delta L_I^{Ac} = L_I^{1Ac} - L_I^{2Ac} = 40 \lg(r_2/r_1)$. Таким образом, скорость спадания уровней активной компоненты интенсивности звука в ближней зоне акустического поля существенно превышает скорость спадания уровней активной компоненты интенсивности в дальней зоне поля. А именно, если $r_2/r_1 = 2$, то величина спадания уровней: $\Delta L_I^{Ac} = 12$ дБ. Как отмечено выше, в дальней зоне акустического поля скорость спадания уровней активной компоненты интенсивности звука не превышает 6 дБ (если в объёме камеры при работе источника шума формируется чисто свободное акустическое поле).

При работе образцового источника шума типа ОИШ-МВ-1 (т. е. центробежного вентилятора без корпуса) шум аэродинамического происхождения излучается преимущественно источниками типа акустических диполей. Причём источники дипольного типа используются при моделировании акустического излучения (в частности, «вихревого» шума), обусловленного, прежде всего, отрывом пограничного слоя от поверхности межлопаточных каналов колеса вентилятора. Отрыв пограничного слоя, как известно, сопровождается интенсивным вихреобразованием [8, 9, 11]. Кроме того, генерация аэродинамического шума в межлопаточных каналах обусловлена пульсациями давления в турбулентном пограничном слое (шум пограничного слоя) и пульсациями давления в турбулентной струе (турбулентный шум) [8].

Таким образом, для моделирования процессов акустического излучения источников широкопо-

лосного аэродинамического шума (со сплошным спектром) целесообразно использовать элементарные источники звука типа акустического диполя. В частности, для моделирования акустического излучения источника шума типа ОИШ-МВ-1 используются именно источники звука типа диполя.

В то же время акустические монополя используются при моделировании излучения тонального шума, обусловленного, в частности, взаимодействием вихревого следа, образующегося при обтекании потоком лопаток колеса, с языком спирального корпуса вентилятора.

В соответствии с изложенным [18], в ближней зоне акустического поля, сформированного в результате акустического излучения источников звука типа акустических диполей (используемых для моделирования излучения источника звука типа ОИШ-МВ-1), скорость спадаения уровней активной компоненты интенсивности звука (согласно, 7, б) существенно превышает скорость спадаения уровней интенсивности звука в дальней зоне поля. В дальней зоне, в соответствии с «законом инверсии», при удвоении величины расстояния от источника звука до измерительной поверхности, величины спадаения уровней давления (ΔL_p) и активной компоненты интенсивности звука не превышают 6 дБ (в чисто свободном акустическом поле). В то же время в ближней зоне величина спадаения уровней давления звука и активной компоненты интенсивности звука достигает 12 дБ (при удвоении расстояния от источника звука до точки измерения).

Как отмечено выше, в гидродинамической ближней зоне, помимо поля звуковых пульсаций давления, также формируется поле псевдозвуковых пульсаций давления, в котором волновое поле в принципе не может сформироваться. В геометрической ближней зоне в результате интерференции звуковых лучей, излучаемых источником звука (т. е. источником звуковых пульсаций давления), формируется неоднородное акустическое поле плоских волн в виде чередующихся интерференционных экстремумов. Таким образом, в ближней зоне поля в отношении скорости спадаения уровней звукового давления «закон инверсии» не может быть применён.

В то же время, в ближней зоне поля, согласно (7), амплитуды колебательной скорости и давления, по мере удаления измерительного микрофона от источника звука уменьшаются в соответствии с законом обратных квадратов (т. е. обратно пропорционально квадрату расстояния $r_{и}$ от источника звука до измерительной поверхности). При этом, в соответствии с формулой (7), уровни колебательной скорости и давления уменьшаются на 12 дБ при

удвоении расстояния $r_{и}$ от источника звука. Следовательно, в ближней зоне поля амплитуда активной компоненты интенсивности звука, по мере увеличения величины расстояния ($r_{и}$) от источника звука до точки измерения, уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния ($r_{и}$)², при этом уровни активной компоненты интенсивности звука (ΔL_I^{Act})_N также уменьшаются на 12 дБ (при удвоении расстояния от источника звука). В низкочастотном диапазоне уровни реактивной компоненты интенсивности звука в ближней зоне существенно превышают уровни активной компоненты интенсивности звука. Однако реактивная компонента интенсивности звука в ближней зоне поля очень быстро затухает (по экспоненциальному закону) по мере удаления от источника псевдозвуковых пульсаций давления.

В низкочастотном диапазоне существенное влияние на результаты акустических измерений оказывают реактивные акустические поля, которые формируются в камере при работе источника звука. В частности, при работе источника звука типа ОИШ-МВ-1 в камере формируется комплексное акустическое поле, включающее в себя две компоненты поля: активную и реактивную. Кроме того, в объёме камеры на первых собственных частотах камеры, вследствие возбуждения собственных мод колебаний, формируется чисто реактивное поле стоячих звуковых волн.

Как отмечено в разделе 1, в низкочастотном диапазоне 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 пограничного слоя от стенок межлопаточных каналов колеса. Причём 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.

Поскольку, как отмечено выше (в разделе 1), в низкочастотном диапазоне при измерении уровней звукового давления в ближней зоне комплексного акустического поля микрофон не может дифференцировать активную и реактивную компоненты акустического поля, то при использовании стандартной методики [1, 3] будет измерен суммарный уровень звукового давления.

В ближней зоне как активной, так и реактивной компоненты комплексного акустического поля формируется поле пульсаций давления: соответственно, звуковых и псевдозвуковых (гидродинамических) пульсаций давления. Принципиальные различия между физическими свойствами активной и реактивной компонент акустического поля в основном проявляются уже за пределами ближней зоны поля. В то же время в низкочастотном диапазоне (в ближней зоне поля) и звуковые и псевдозвуковые пульсации давления оказывают практически одинаковое динамическое воздействие на мембрану микрофона.

Поэтому различить активную и реактивную компоненты комплексного акустического поля с помощью стандартной методики [1] невозможно, раздельное измерение активной и реактивной компонент акустического поля возможно только с помощью метода акустической интенсивности. Современное программное обеспечение, которое используется в приборе (анализаторе спектра), обеспечивает возможность вычисления активной и реактивной компонент интенсивности звука с помощью выражений (2) и (3).

Однако, при одновременном формировании в объёме камеры чисто реактивного поля стоячих звуковых волн и комплексного акустического поля источника шума типа ОИШ-МВ-1, даже с использованием интенсивности невозможно разделить эти акустические поля при возбуждении собственных резонансов объёма. Как известно, на первых собственных частотах объёма камеры возбуждаются собственные резонансные моды колебаний. При этом чисто реактивное акустическое поле занимает весь объём камеры. Как известно, в чисто реактивном поле стоячих звуковых волн сдвиг фаз между давлением и колебательной скоростью составляет 90° , поэтому активная компонента интенсивности в чисто реактивном поле стоячих звуковых волн равна нулю.

В комплексном акустическом поле источника звука реактивная компонента формируется только в ближней зоне акустического поля, причём реактивная компонента быстро ослабляется (затухает) по мере удаления точки измерения от источника звука. Поэтому в дальней зоне комплексного поля формируется чисто активное поле звуковых волн, а реактивное поле формируется только в пределах ближней зоны. Причём в качестве реактивной компоненты комплексного акустического поля в ближней зоне формируется поле псевдозвуковых пульсаций давления, а звуковые волны не могут сформироваться в этом реактивном поле, поскольку среда утрачивает упругие свойства (ведёт себя как несжимаемая).

В отличие от реактивной компоненты комплексного акустического поля, чисто реактивное поле стоячих звуковых волн формируется не в ближней зоне источника звука (в которой формируется поле пульсаций давления), а в дальней зоне. Причём реактивное поле стоячих волн (в отличие от реактивной компоненты комплексного акустического поля источника звука) имеет чисто волновую физическую природу, поскольку это поле формируется в результате суммирования звуковых волн, которые отражаются от двух противоположных ограждающих поверхностей камеры. Реактивный характер поля стоячих звуковых волн обусловлен отсутствием волнового движения в этом поле, т. е. акустическая энергия не передаётся колеблющимися частицами среды. Давление в поле стоячих волн описывается следующим выражением: $P(t) = 2P\cos(kx)\cos(\omega t)$, где k – волновое число; $k = \omega/c$.

В этом чисто реактивном поле сдвиг фаз между звуковым давлением и колебательной скоростью равен 90° . В поле стоячих волн акустическая энергия сконцентрирована преимущественно в областях пучностей колебаний, а в узловых областях энергия пренебрежимо мала. При этом энергия не распространяется в объёме камеры.

При проведении интенсивметрических измерений в ближней зоне поля источника звука типа ОИШ-МВ-1 на первых собственных (резонансных) частотах объёма камеры на интенсивметрический зонд одновременно оказывают динамическое воздействие две компоненты (активная и реактивная) комплексного акустического поля источника звука и реактивное поле стоячих звуковых волн. На частотах ниже 100 Гц микрофон не может различить эти 3 поля, все они оказывают одинаковое динамическое воздействие на мембрану микрофона. Программное обеспечение анализатора позволяет вычислить по отдельности характеристики активной и реактивной компоненты поля и, таким образом, разделить эти акустические поля. Однако, с помощью этого программного обеспечения невозможно вычислить акустическую характеристику реактивного поля стоячих волн, формирующегося в объёме камеры. Поэтому в результате интенсивметрических измерений невозможно выделить акустическую характеристику поля стоячих волн.

На практике обе компоненты комплексного акустического поля источника звука будут суммироваться с чисто реактивным полем стоячих звуковых волн. В результате такого суммирования на первых собственных частотах объёма камеры можно определить только суммарную характеристику двух акустических полей: комплексного поля ис-

точника звука и реактивного поля стоячих звуковых волн. Следовательно, результаты акустических измерений искажаются вследствие возбуждения в объеме камеры поля стоячих звуковых волн на её первых собственных частотах. Устранить влияние этого «паразитного» поля в практике инженерных измерений, по-видимому, невозможно. Поэтому при проведении интенсивметрических измерений чисто реактивное поле стоячих волн является источником систематических погрешностей измерений. Поскольку в объеме любой камеры всегда возбуждаются собственные моды на первых собственных частотах (причём на низких частотах обеспечить эффективное поглощение звуковых волн практически невозможно), то, чтобы учесть влияние этой погрешности на результаты измерений, следует путём вычисления и измерений определить первые собственные (резонансные) частоты камеры.

Таким образом, проведение метрологической аттестации заглушённой акустической камеры в низкочастотном диапазоне (с использованием стандартной методики измерений, описанной в [1, 3] либо в [4, 5]) сопряжено с рядом принципиальных проблем и ограничений. В соответствии со стандартной методикой в результате аттестации акустическое поле в камере должно быть квалифицировано как чисто свободное или существенно свободное акустическое поле, которое формируется в дальней зоне акустического поля источника звука. Однако на практике, при проведении измерений в низкочастотном диапазоне (а именно, ниже 100 Гц), измерительная поверхность расположена в ближней зоне поля, в которой поле не является ни свободным, ни, даже, существенно свободным.

Причём на самых низких частотах микрофон не может отличить чисто статическое давление (в чисто реактивном поле) от квазистатического давления в активном поле. В активном и реактивном акустических полях на мембрану микрофона оказывается практически одинаковое динамическое воздействие. Поэтому в низкочастотном диапазоне результат измерения спектральных уровней звукового давления соответствует результату, полученному при суммировании уровней звукового давления (в активном и реактивном акустических полях). При измерении уровней звукового давления в ближней зоне можно определить только суммарные уровни давления звука в комплексном акустическом поле. Измерить по отдельности характеристики активной и реактивной компонент этого поля на самых низких частотах принципиально невозможно.

Для решения метрологических проблем, связанных с аттестационными измерениями уровней зву-

кового давления в низкочастотном диапазоне, по существу, можно использовать в качестве эксклюзивного альтернативного метода только интенсивметрические аттестационные измерения. При проведении таких измерений аттестация камеры основывается на результатах измерений уровней интенсивности звука на двух измерительных поверхностях. При этом результаты измерения уровней звукового давления используются как чисто вспомогательные. На основании результатов таких интенсивметрических измерений определяется скорость спадаения уровней интенсивности звука по мере увеличения расстояния от источника звука до точки измерения.

В соответствии с изложенным, в данной работе представлены результаты экспериментального исследования эффективности применения метода акустической интенсивметрии для метрологической аттестации акустической камеры. Интенсивметрические измерения являются альтернативным методом аттестационных испытаний камеры по отношению к традиционным методам. А именно по отношению к методу, рассмотренному в стандартах [1, 3], и методам, рассмотренным в отраслевых методиках.

Для разработки корректной методики метрологической аттестации акустической заглушённой камеры необходимо предварительно провести исследование основных источников систематических погрешностей (прежде всего, в низкочастотном диапазоне) как при измерении уровней звукового давления, так и при проведении интенсивметрических измерений.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований характеристик акустических полей, формирующихся в объеме заглушённой акустической камеры АО «Корпорация «ВНИИЭМ» при работе источника шума типа ОИШ-МВ-1.

3.2. Результаты экспериментальных исследований эффективности применения акустической интенсивметрии для проведения аттестации акустической камеры. В соответствии с программой экспериментальных исследований, направленных на разработку новой альтернативной методики метрологической аттестации заглушённой акустической камеры, на первом этапе проводится квалификация акустического поля, формирующегося в камере при работе образцового источника звука типа ОИШ-МВ-1.

На основании результатов интенсивметрических измерений, которые проводились на измерительной поверхности (с помощью двухмикрофонного зонда), с использованием специального программ-

ного обеспечения, разработанного для измерений и вычислений уровней интенсивности звука, были вычислены основные характеристики комплексного акустического поля. А именно уровни звукового давления, уровни активной и реактивной компонент интенсивности звука, уровни мощности акустического излучения.

В рамках программы аттестационных испытаний акустической камеры в результате интенсивметрических измерений, проведённых на двух измерительных поверхностях (№№ 1 и 2), была определена величина разности уровней интенсивности звука (а также величина разности уровней звукового давления) на этих поверхностях. Причём, для проведения измерений в зонде были использованы две микрофонные проставки: длиной 100 и 50 мм, соответственно, для измерений в области низких и средних частот.

Кроме того, были определены значения индекса реактивности (F_{pi}) акустического поля для определения степени реактивности комплексного акустического поля, формирующегося в камере при работе источника шума типа ОИШ-МВ-1.

Результаты интенсивметрических измерений, проведённых в камере в области низких и средних частот, представлены в табл. и на рис. 2. В частности, были определены значения разности уровней активной компоненты интенсивности на измерительных поверхностях № 1 и № 2, а также разности уровней давления звука, измеренных на этих измерительных поверхностях (№№ 1 и 2).

Для определения скорости спада с расстоянием уровней интенсивности звука (и звукового давления) были определены значения уровней активной компоненты интенсивности звука на измерительных поверхностях №№ 1 и 2, а также значения разности уровней активной компоненты интенсивности, измеренных на этих двух поверхностях. Кроме того, были определены значения реактивной компоненты интенсивности звука на измерительных поверхностях №№ 1 и 2, а также значения разности уровней реактивной компоненты интенсивности звука, измеренных на этих двух поверхностях. В табл. представлены также результаты измерения уровней активной и реактивной компонент интенсивности звука на измерительной поверхности № 1.

Дополнительные интенсивметрические измерения были проведены в производственном помещении АО «Корпорация «ВНИИЭМ» (габаритные размеры помещения: 7,0 × 6,0 × 11,0 м) с жёсткими ограждающими конструкциями. Результаты измерения разности уровней активной компоненты ин-

тенсивности звука на двух измерительных поверхностях (№№ 1 и 2) и разности уровней звукового давления на этих измерительных поверхностях также приведены в табл. (столбцы 8 и 9).

Согласно результатам расчёта по формуле (1), в свободном акустическом поле, в соответствии с «законом инверсии», при проведении измерений на измерительных поверхностях №№ 1 и 2, предельные значения разности уровней звукового давления (ΔL_p^{Max}), так же, как и значения разности уровней активной компоненты интенсивности звука (ΔL_I^{Max}), равны: $\Delta L_p^{\text{Max}} = \Delta L_I^{\text{Max}} = 7,7$ дБ.

В то же время, согласно результатам интенсивметрических измерений (приведённым в табл.), в низкочастотном диапазоне значения разности уровней звукового давления ΔL_p (на измерительных поверхностях №№ 1 и 2), измеренные в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами от 31,5 Гц до 160 Гц, превышают предельное значение: ($\Delta L_p^{\text{Max}} = 7,7$ дБ). На более высоких частотах (в диапазоне третьоктавных полос со среднегеометрическими частотами от 200 до 1250 Гц) значения разности уровней давления не превышают предельного значения: $\Delta L_p \leq \Delta L_p^{\text{Max}}$. В этом диапазоне частот значения ΔL_p варьируются в пределах: 5,1 ÷ 7,0 дБ (табл., столбец 4).

Согласно результатам интенсивметрических измерений, на самых низких частотах значения разности уровней активной компоненты интенсивности звука (на поверхностях №№ 1 и 2), измеренные в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами от 31,5 Гц до 80 Гц, превышают предельное значение ($\Delta L_I^{\text{Max}} = 7,7$ дБ).

На более высоких частотах (а именно в диапазоне третьоктавных полос со среднегеометрическими частотами от 100 до 1250 Гц) значения разности уровней активной компоненты интенсивности звука не превышают предельного значения: $\Delta L_I^{Ac} \leq \Delta L_I^{\text{Max}}$. В этом диапазоне частот значения разности уровней ΔL_I^{Ac} варьируются в пределах: 1,0 ÷ 7,0 дБ (табл., столбец 3).

Таким образом, согласно результатам интенсивметрических измерений, на самых низких частотах (ниже 100 Гц) комплексное акустическое поле, формирующееся в акустической камере (при работе источника звука типа ОИШ-МВ-1), не может быть классифицировано ни как «свободное», ни как «существенно свободное» акустическое поле. Как следует из результатов измерений, при увеличении расстояния от источника звука до измери-

тельной поверхности ни скорость спадаения уровней звукового давления, ни скорость спадаения уровней интенсивности звука (с расстоянием) не соответствуют результатам расчётов (по формуле (1)) для условий свободного акустического поля. А именно, на низких частотах в камере не действует «закон инверсии», который используется для описания структуры свободного акустического поля.

Согласно результатам измерений (табл., столбец 4), проведённых на двух измерительных поверхностях: №№ 1 и 2, разность уровней звукового давления (ΔL_p) в низкочастотном диапазоне ($f \leq 160$ Гц) существенно превышает предельное значение ($\Delta L_p^{\text{Max}} = 7,7$ дБ).

Дело в том, что в низкочастотном диапазоне (ниже 100 Гц) размер измерительной поверхности существенно меньше длины звуковой волны (равной 3,4 м на частоте 100 Гц). Поэтому, согласно результатам расчётов, обе измерительные поверхности (№№ 1 и 2) расположены в ближней зоне акустического поля. В то же время, как отмечено ранее (в частности, в разделе «Введение»), «закон инверсии» выполняется исключительно в свободном звуковом поле (т. е. в поле сферических звуковых волн), которое может сформироваться только в дальней зоне акустического поля.

Как было отмечено в разделе 3.1, в ближней зоне акустического поля скорость спадаения уровней

Результаты измерения скорости спадаения уровней интенсивности звука (и уровней давления звука) с расстоянием в комплексном акустическом поле

Частота (f_c), Гц	Измерения в полузаглушённой акустической камере АО «Корпорация «ВНИИЭМ»						Измерения в производственном помещении	
	$(L_I^{Ac})_1$, дБ	ΔL_I^{Ac} , дБ	ΔL_p , дБ	L_p^1 , дБ	$(L_I^R)_1$, дБ	ΔL_I^R , дБ	ΔL_I^{Π} , дБ	ΔL_p^{Π} , дБ
1	2	3	4	5	6	7	8	9
31,5	92,5	12,0	15,5	105,0	122,0	24,0	12,0	16,0
40	94,0	32,0	22,0	92,0	107,0	23,0	20,5	21,0
50	76,0	10,0	19,0	90,5	103,5	21,0	15,0	17,5
63	84,0	14,0	17,0	90,0	101,5	19,0	15,5	15,5
80	81,5	8,0	13,0	88,0	100,0	16,0	9,5	11,0
100	78,0	1,0	9,5	89,0	98,5	12,0	2,0	5,5
125	80,5	3,0	8,5	87,0	95,0	10,5	4,5	6,0
160	81,0	5,0	8,0	85,0	91,0	8,5	5,5	5,0
200	80,5	6,0	7,0	83,0	89,0	11,0	6,0	5,5
250	80,0	6,0	6,5	82,0	87,0	13,5	6,5	5,5
315	79,5	7,0	7,0	81,0	84,0	6,5	6,5	5,0
400	79,5	7,0	6,5	81,0	82,0	7,0	7,0	5,0
500	79,5	6,0	6,0	81,0			6,5	4,5
630	81,0	5,5	7,5	83,0			6,0	4,0
800	81,5	5,0	5,0	84,0			5,5	4,0
1000	82,0	6,0	5,5	84,0			5,5	4,0
1250	82,5	6,5	6,5	84,5			6,0	4,0
1600	82,0	6,0	5,5	84,5			6,5	4,0

Примечание: f_c – среднегеометрические частоты третьоктавных частотных полос (Гц); ΔL_I^{Ac} – разность уровней активной компоненты интенсивности звука $[(L_I^{Ac})_1 \text{ и } (L_I^{Ac})_2]$, измеренных в камере, соответственно, на двух измерительных поверхностях (№ 1 и № 2); $\Delta L_I^{Ac} = (L_I^{Ac})_1 - (L_I^{Ac})_2$; ΔL_I^R – разность уровней реактивной компоненты интенсивности звука $[(L_I^R)_1 \text{ и } (L_I^R)_2]$, измеренных в камере, соответственно, на двух измерительных поверхностях (№ 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 (№ 1 и № 2); $\Delta L_p = L_p^1 - L_p^2$; $(\Delta L_I^A)^{\Pi}$ – разность уровней активной компоненты интенсивности звука $[(L_I^A)_1^{\Pi} \text{ и } (L_I^A)_2^{\Pi}]$, определённых в результате измерений в производственном помещении, соответственно, на двух измерительных поверхностях (№ 1 и № 2); $(\Delta L_I^A)^{\Pi} = (L_I^A)_1^{\Pi} - (L_I^A)_2^{\Pi}$; ΔL_p^{Π} – разность уровней звукового давления $[(L_p^{\Pi})_1 \text{ и } (L_p^{\Pi})_2]$, измеренных в производственном помещении, соответственно, на двух измерительных поверхностях (№ 1 и № 2); $\Delta L_p^{\Pi} = (L_p^{\Pi})_1 - (L_p^{\Pi})_2$.

интенсивности звука с расстоянием существенно выше, чем в свободном поле (т. е. в дальней зоне акустического поля, которое формируется при работе источника звука). Согласно [18], в ближней зоне акустического поля величина скорости спада уровня колебательной скорости и колебательного давления с расстоянием вычисляется с помощью выражения (7). Поэтому, при удвоении величины расстояния от источника звука до измерительной поверхности ($r_{и}$), уровни колебательной скорости и колебательного давления (а также уровни интенсивности звука) должны уменьшаться на 12 дБ (в отличие от дальней зоны поля, в которой в этом случае величина спада уровней колебательной скорости и давления составляет только 6 дБ).

В то же время в низкочастотном диапазоне в поле звуковых и псевдозвуковых пульсаций давления, которое формируется в ближней зоне комплексного акустического поля, уровни звукового давления суммируются, поскольку, как отмечалось выше, микрофон не может отличить активную компоненту поля от реактивной компоненты.

Обе компоненты поля оказывают практически одинаковое воздействие на микрофон, поскольку в обоих случаях динамическое воздействие на микрофон оказывает квазистатическое давление. На низких частотах (ниже 100 Гц) влияние частоты колебаний на характер динамического воздействия крайне незначительно. Поэтому можно считать, что и звуковые и псевдозвуковые пульсации давления (в комплексном акустическом поле) оказывают на микрофон практически одинаковое квазистатическое давление. При этом обе составляющие акустического поля (активная и реактивная) суммируются и значения уровней давления в акустическом поле равны сумме уровней давления в двух полях пульсаций давления: в поле звуковых и в поле псевдозвуковых пульсаций давления.

Причём измерить по отдельности характеристики этих двух полей (звуковых и псевдозвуковых пульсаций давления) практически невозможно, поскольку с помощью используемого в анализаторе типа «Scadas Mobile» программного обеспечения можно определить только суммарные уровни звукового давления (измеренные прибором).

Как отмечено выше, в ближней зоне комплексного акустического поля интенсивность звука пропорциональна произведению усреднённых значений звукового давления и колебательной скорости. При этом реактивная компонента интенсивности звука пропорциональна произведению комплексного значения давления и комплексно сопряжённого с ним значения колебательной скорости [20].

В соответствии с [18], в ближней зоне комплексного акустического поля (поля звуковых и псевдозвуковых пульсаций давления) скорость спада уровня активной компоненты интенсивности звука (по мере увеличения расстояния от источника звука), определяется так же, как и для колебательной скорости и колебательного давления. В частности, при удвоении расстояния от источника звука до точки измерения, уровень активной компоненты интенсивности звука уменьшится на 12 дБ.

В соответствии с результатами теоретического анализа (приведёнными в разделе 3.1), в ближней зоне акустического поля скорость спада уровня активной компоненты интенсивности звука с расстоянием существенно превышает значения скорости спада уровня активной компоненты интенсивности звука в дальней зоне акустического поля. Согласно результатам расчёта (на основе [18]), в ближней зоне поля величина спада уровня активной компоненты интенсивности звука ΔL_I^{Ac} при увеличении расстояния от источника звука до точки измерения в 2,4 раза (на измерительных поверхностях №№ 1 и 2) составляет 15,5 дБ.

Следовательно, результаты интенсивметрических измерений, представленные в табл. (столбец 3), близки к расчётным результатам. Измеренные величины спада уровня активной компоненты интенсивности звука с расстоянием в диапазоне частот, ограниченном третьоктавными полосами со среднегеометрическими частотами 31,5; 50; 63 и 80 Гц варьируются в пределах 8 – 14 дБ и, следовательно, не превышают предельного расчётного значения:

$(\Delta L_I^{Ac})^{Max} = 15,5$ дБ. Исключение, согласно табл.

(столбцы 2 и 3), составляет одна третьоктава со среднегеометрической частотой 40 Гц, в которой отмечены максимальный уровень активной компоненты интенсивности звука и величина спада (с расстоянием) уровня активной компоненты интенсивности звука (32 дБ). Этот результат обусловлен возбуждением собственной моды колебаний на одной из первых собственных частот объёма камеры. На такой низкой частоте даже с использованием интенсивметрического метода измерений невозможно разделить акустические поля, которые одновременно формируются в камере. Поэтому результат интенсивметрических измерений акустической характеристики источника звука типа ОИШ-МВ-1 (для этой третьоктавы: 40 Гц) определяется характеристикой чисто реактивного поля стоячих звуковых волн, которое формируется в камере в результате сложения звуковых волн, отражённых от противоположных ограждающих поверхно-

стей. Уровень интенсивности звука в этом реактивном поле (в пучностях колебаний) значительно выше уровней интенсивности звука во всех остальных акустических полях, формирующихся в камере. Следовательно, чисто реактивное поле стоячих звуковых волн, формирующееся в объеме камеры на первых собственных частотах камеры, является одним из основных источников систематических погрешностей при проведении интенсивметрических измерений.

Из сопоставления результатов измерения скорости спада (по мере удаления от источника звука типа ОИШ-МВ-1) уровней активной компоненты интенсивности звука (ΔL_I^{Ac}) и уровней звукового давления (ΔL_P) следует (табл., столбцы 3 и 4 и рис. 2), что при проведении интенсивметрических измерений (измерений уровней интенсивности звука) результаты существенно отличаются от результатов, полученных при измерении уровней звукового давления. Причём наиболее значительные отличия между величинами ΔL_I^{Ac} и ΔL_P отмечены в низкочастотном диапазоне (когда частота $f_c \leq 250$ Гц). На более высоких частотах отличия между этими величинами, как правило, не превышают 1 дБ.

Как было отмечено выше, в низкочастотном диапазоне основным источником систематической

погрешности при измерении уровней звукового давления является реактивная компонента комплексного акустического поля, которое формируется в камере при работе источника звука типа ОИШ-МВ-1. На низких частотах микрофон не может отличить динамическое воздействие на мембрану, оказываемое в реактивном поле (поле псевдозвуковых пульсаций давления), от воздействия, оказываемого в активном акустическом поле (поле звуковых пульсаций давления). Поэтому эти две компоненты комплексного поля суммируются и, таким образом, при измерении уровней звукового давления в действительности анализатор измеряет суммарные уровни звукового давления.

Следовательно, измеренные значения уровней звукового давления, соответствуют суммарным уровням звукового давления (в активном и реактивном акустических полях). При этом низкочастотная систематическая погрешность измерений определяется именно уровнями реактивной компоненты комплексного акустического поля. Поскольку в низкочастотном диапазоне уровни реактивной компоненты комплексного акустического поля значительно выше уровней активной компоненты поля, систематическая погрешность измерений достигает значительных величин.

Согласно результатам интенсивметрических измерений на измерительной поверхности № 1 (табл., столбцы 2 и 5) в низкочастотном диапазоне (ниже 200 Гц), из сравнения уровней активной компоненты интенсивности звука (L_I^{Ac})₁ и уровней звукового давления (L_P^1) следует, что в результате измерений получены завышенные уровни звукового давления. Систематическая погрешность при измерении уровней звукового давления обусловлена влиянием реактивной компоненты комплексного акустического поля на результаты измерений. Кроме того, в объеме камеры на её первых собственных частотах формируется чисто реактивное поле стоячих звуковых волн. Это реактивное поле также является источником систематических погрешностей.

Как было отмечено выше, на низких частотах микрофон не может отличить динамическое воздействие, оказываемое на мембрану в активном акустическом поле (поле звуковых пульсаций давления), от аналогичного воздействия в реактивном поле (поле псевдозвуковых пульсаций давления). Поскольку обе компоненты давления (активная и реактивная) воспринимаются микрофоном как равнозначные, то в результате измерений эти компоненты суммируются. При этом результаты измерений оказываются завышенными на величину, соот-

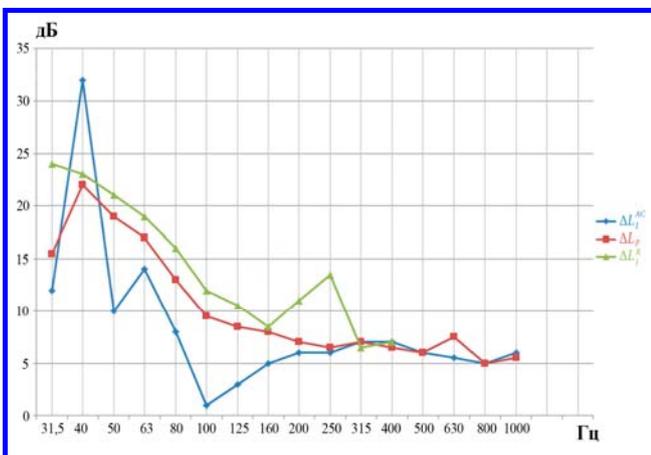


Рис. 2. Скорость спада уровней (дБ) интенсивности и звукового давления в комплексном акустическом поле источника звука при увеличении расстояния от образцового источника звука до измерительной поверхности с 0,35 до 0,85 м (в 2,43 раза): ΔL_I^{Ac} ; ΔL_I^R – соответственно, скорость спада уровней (дБ) активной и реактивной компонент интенсивности звука в комплексном акустическом поле источника звука типа ОИШ-МВ-1; ΔL_P – скорость спада уровней звукового давления (дБ) в комплексном акустическом поле

ветствующую уровням звукового давления в реактивном поле псевдозвуковых пульсаций давления. Таким образом, при измерении уровней звукового давления в низкочастотном диапазоне (в ближней зоне поля) систематическая погрешность измерений обусловлена возбуждением чисто реактивной компоненты комплексного акустического поля (т. е. поля псевдозвуковых пульсаций давления).

В то же время при измерении уровней активной компоненты интенсивности звука (в поле звуковых пульсаций) с помощью специального программного обеспечения, предназначенного для интенсивметрических измерений, анализатор типа «Scadas Mobile» выделяет только активную компоненту комплексного акустического поля. Поэтому реактивная компонента поля практически не оказывает влияния на результаты измерений.

При измерении давления звука максимальные значения систематической погрешности измерений зафиксированы на самых низких частотах (в третьоктавах со среднегеометрическими частотами 31,5; 50; 63; 80; 100; 125 Гц). В этом диапазоне частот величина систематической погрешности варьируется в пределах: от 6,0 до 13,5 дБ. Следует подчеркнуть, что в соответствии с международными стандартами [1, 2] для измерения акустических характеристик (уровней звуковой мощности) изделий уровни звукового давления могут быть измерены только в дальней зоне акустического поля. Проведение измерений в ближней зоне поля не допускается действующими стандартами, поэтому требования отраслевой методики измерений, в соответствии с которыми уровни звукового давления должны быть измерены в ближней зоне поля, метрологически некорректны. Следовательно, при проведении измерений в низкочастотном диапазоне, требования, сформулированные в отраслевой методике, не могут быть реализованы в инженерной практике.

В то же время при измерении уровней интенсивности звука программное обеспечение анализатора обеспечивает возможность раздельного измерения уровней активной и реактивной компонент интенсивности звука. На основании результатов измерения величины ΔL_I^{Ac} (т. е. скорости спадаения уровней активной компоненты интенсивности звука) обеспечивается возможность проведения корректной метрологической аттестации акустической камеры.

Как отмечено выше, в низкочастотном диапазоне реактивная компонента комплексного акустического поля очень быстро затухает (по мере удаления точки измерения от источника звука). Поэтому скорость спадаения уровней звукового давле-

ния в комплексном акустическом поле (по мере увеличения расстояния между источником звука и точкой измерения) значительно превышает скорость спадаения (с расстоянием) уровней активной компоненты интенсивности звука.

Паспортная акустическая характеристика образцового источника шума типа ОИШ-МВ-1 была определена (в диапазоне частот от 50 до 11000 Гц) в рамках его калибровки в полностью заглушённой акустической камере ФГУП «ВНИИФТРИ». При этом уровни акустической мощности источника звука были определены на основании результатов измерения уровней звукового давления на полусферической измерительной поверхности с радиусом 2 м.

Согласно результатам сравнения результатов измерений акустической характеристики (третьоктавного спектра звуковой мощности) источника звука типа ОИШ-МВ-1 в заглушённой камере ФГУП «ВНИИФТРИ» (на основании стандарта [1]) и в полузаглушённой акустической камере АО «Корпорация «ВНИИЭМ» (с использованием метода акустической интенсивметрии [15]), максимальные значения систематической погрешности измерений зафиксированы в низкочастотном диапазоне. В частности, в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 50; 80; 100; 125 Гц значения погрешности измерений варьировались в пределах от 2 до 7 дБ.

Источником этой погрешности измерений являются реактивные акустические поля, которые оказывают влияние на результаты измерений акустических характеристик изделия (источника шума типа ОИШ-МВ-1) в комплексном акустическом поле. Кроме того, на первых собственных частотах объёма камеры ФГУП «ВНИИФТРИ» в ней возбуждается чисто реактивное поле стоячих звуковых волн. Это реактивное поле также является одним из источников систематических погрешностей при проведении аттестационных измерений в камере.

Причём устранить влияние этого чисто реактивного поля, формирующегося на первых собственных частотах объёма камеры невозможно в принципе. Собственные моды колебаний неизбежно будут возбуждаться на первых собственных (резонансных) частотах камеры. Поэтому влияние собственных резонансных мод колебаний на результаты измерений квалифицируется как один из видов систематических погрешностей, обусловленных резонансными свойствами измерительного помещения (камеры).

Согласно результатам измерений (рис. 2 и табл., столбцы 3 и 7), в низкочастотном диапазоне скорость спадаения реактивной компоненты интенсивности звука ΔL_I^R (по мере удаления точки измерения

от источника звука) значительно превышает скорость спада активной компоненты интенсивности ΔL_I^{Ac} . Как отмечено выше, в реактивном поле (поле псевдозвуковых пульсаций давления) акустическая энергия затухает по экспоненциальному закону.

Поскольку измерительное помещение оказывает весьма существенное влияние на результаты акустических измерений в этом помещении, в рамках данной работы были проведены дополнительные исследования с целью оценки степени влияния помещения с жёсткими ограждающими конструкциями на результаты измерений.

Согласно результатам акустических измерений (табл., столбцы 8 и 9), проведённых в производственном помещении (с объёмом свободного пространства – 462 куб. м.) с жёсткими ограждающими конструкциями, в низкочастотном диапазоне (при проведении измерений в ближней зоне) в этом помещении «закон инверсии» не выполняется. Измерения проводились в комплексном акустическом поле, которое формируется в объёме камеры при работе источника звука типа ОИШ-МВ-1, при этом двухмикрофонный зонд устанавливался на измерительной поверхности № 1 (с габаритными размерами 1,0 × 1,0 × 1,0 м) и № 2 (с габаритными размерами 2,0 × 2,0 × 2,0 м).

В комплексном акустическом поле на измерительных поверхностях №№ 1 и 2 были измерены уровни активной компоненты интенсивности звука и уровни звукового давления. Затем были вычислены: величина скорости спада (по мере увеличения расстояния от источника звука до точки измерения) уровней активной компоненты (ΔL_I^{II}) интенсивности звука и величина скорости спада уровней звукового давления (ΔL_P^{II}). Естественно, в этом помещении, вследствие отражения звуковых волн от жёстких ограждающих конструкций, в области средних и высоких частот помещение оказывает влияние на результаты измерений. Следует отметить, что в таком помещении не может сформироваться ни чисто «свободное», ни даже «существенно свободное» акустическое поле, поскольку вследствие многократных отражений звуковых волн от жёстких ограждающих поверхностей в помещении формируется квазидиффузное акустическое поле. Поэтому такое помещение оказывает существенное влияние на результаты акустических измерений.

Согласно результатам измерений, проведённых в комплексном акустическом поле в низкочастотном диапазоне, значения скорости спада уровней активной компоненты интенсивности звука ΔL_I^{II} существенно меньше соответствующих значений скорости спада уровней звукового давления ΔL_P^{II} . В частно-

сти, в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами 31,5; 50; 80; 125 Гц разность между величинами ΔL_P^{II} и ΔL_I^{II} , измеренными на измерительной поверхности № 1 (с габаритными размерами 1,0 × 1,0 × 1,0 м) варьируется в пределах от 1,5 до 4 дБ. Таким образом, в низкочастотном диапазоне при использовании современной методики аттестационных испытаний [1, 3] (основанной на измерении скорости спада уровней звукового давления в комплексном акустическом поле) на результаты измерений оказывает существенное влияние систематическая погрешность, обусловленная воздействием на измерительный микрофон реактивных акустических полей.

Как отмечено выше, в реактивном акустическом поле псевдозвуковые пульсации давления оказывают такое же динамическое воздействие на мембрану микрофона, как и звуковые пульсации давления в активном акустическом поле. Кроме того, в объёме помещения на первых собственных частотах камеры возбуждается чисто реактивное поле стоячих звуковых волн, которое также оказывает динамическое воздействие на микрофон. Таким образом, реактивные акустические поля оказывают влияние на результаты акустических измерений, эти поля в низкочастотном диапазоне являются источником систематической погрешности.

Согласно результатам измерений в области средних и высоких частот (табл., столбцы 8 и 9), в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами от 315 до 1600 Гц разность между величинами ΔL_P^{II} и ΔL_I^{II} , измеренными на измерительной поверхности № 1, варьируется в пределах от 1,5 до 2,5 дБ.

Из сопоставления значений величины спада (с расстоянием) уровней интенсивности звука (ΔL_I^{II}) в активном поле звуковых пульсаций давления и величины спада уровней давления (ΔL_P^{II}) в комплексном акустическом поле (в котором суммируются активная и реактивная компоненты поля) следует, что в низкочастотном диапазоне при использовании интенсивметрии (вместо измерения уровней давления звука) существенно повышается точность измерений. Повышение точности измерений обеспечивается за счёт устранения влияния систематической погрешности на результаты измерений.

4. Методические основы применения акустической интенсивметрии для проведения метрологической аттестации заглушённой акустической камеры

Как было отмечено в разделе «Введение» и в разделе 3, при использовании современных мето-

дик аттестационных испытаний заглушённых акустических камер [1, 3] в низкочастотном диапазоне результаты измерений существенно искажаются вследствие влияния систематических погрешностей измерений. В то же время, в соответствии с отраслевой методикой измерений акустических характеристик электродвигателей специального назначения, измерения должны проводиться в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами от 31,5 Гц до 10000 Гц. Таким образом, для официальной приёмки изделий специального назначения акустическая камера должна быть аттестована во всём диапазоне частот, начиная с самых низких частот: $f \leq 25$ Гц (т. е., начиная практически с инфразвуковых частот). Следовательно, метрологические возможности действующей методики аттестационных испытаний не соответствуют требованиям, которые установлены для акустических характеристик электродвигателей специального назначения в Технических условиях на серийную продукцию АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

В соответствии с результатами теоретического анализа и экспериментальных исследований характеристик комплексного акустического поля, в низкочастотном диапазоне в ближней зоне источника звука (типа ОИШ-МВ-1) формируются акустические поля звуковых и псевдозвуковых пульсаций давления, которые квалифицируются, соответственно, как активная и реактивная компоненты комплексного акустического поля. Пульсации давления возбуждаются вследствие отрыва пограничного слоя в межлопаточных каналах источника звука (колеса вентилятора).

Анализ процессов формирования в заглушённой акустической камере низкочастотных составляющих комплексных акустических полей показывает, что для проведения корректной метрологической аттестации акустической камеры в низкочастотном диапазоне необходимо использовать методику измерений, которая обеспечивает возможность раздельного измерения характеристик активной и реактивной составляющих комплексного акустического поля.

Как отмечено выше, при использовании стандартной методики [1, 3], основанной на измерении уровней звукового давления, в низкочастотном диапазоне в ближней зоне акустического поля невозможно измерить по отдельности характеристики активной и реактивной компонент комплексного акустического поля. При использовании этой методики можно измерить только суммарные уровни звукового давления в комплексном акустическом поле. Несмотря на принципиально различную физическую природу поля звуковых и поля псевдозвуковых пульсаций давления (т. е., соот-

ветственно, активной и реактивной компонент поля), на самых низких частотах (ниже 100 Гц) эти пульсации давления оказывают практически одинаковое динамическое воздействие на мембрану микрофона. Следует, однако, отметить, что реактивная компонента поля, в отличие от активной компоненты поля, очень быстро затухает с расстоянием (при удалении точки измерения от источника звука). В то же время при проведении аттестации камеры, в соответствии с [1, 3], в качестве критерия для классификации акустического поля, формирующегося в камере, используется скорость спада уровней звукового давления с расстоянием. Классификация акустического поля основывается на проверке соответствия этого критерия (а именно скорости спада уровней давления звука с расстоянием) «закону инверсии». Причём аттестационные испытания должны проводиться только в отношении активной компоненты комплексного акустического поля (звуковых пульсаций давления или волн звука), поэтому на низких частотах реактивная компонента поля квалифицируется как источник систематической погрешности, искажающий результаты аттестационных измерений. Следует подчеркнуть, что в низкочастотном диапазоне, вследствие влияния реактивной компоненты поля на скорость спада с расстоянием суммарных уровней давления, невозможно провести корректные аттестационные испытания акустической камеры. На низких частотах значения скорости спада уровней давления звука (с расстоянием) зависят преимущественно от скорости спада уровней реактивной компоненты поля (то есть поля псевдозвуковых пульсаций давления), а провести испытания для активной компоненты поля невозможно, поскольку в соответствии с методикой [1, 3] на низких частотах невозможно измерить по отдельности характеристики активной и реактивной компонент комплексного поля.

Таким образом, при использовании аттестационной методики [1, 3], согласно результатам теоретического анализа и экспериментальных исследований, в низкочастотном диапазоне систематическая погрешность аттестационных измерений, которые проводятся в камере, обусловлена формированием реактивных акустических полей. Поэтому корректная методика аттестационных измерений должна обеспечивать возможность раздельного измерения характеристик двух компонент поля: активной и реактивной.

В соответствии с результатами теоретического анализа [14, 18] и экспериментальных исследований возможностей метода акустической интенсивности, именно этот метод может быть использован в качестве эксклюзивной альтернативной методики

метрологической аттестации заглушённых акустических камер, а также в качестве метода измерений акустических характеристик изделий в низкочастотном диапазоне в ближней зоне акустического поля.

К принципиальным преимуществам метода акустической интенсивности (по сравнению с методами, предусматривающими измерение уровней звукового давления) следует отнести возможность раздельного измерения акустических характеристик активной и реактивной составляющих комплексного акустического поля. Кроме того, к важным преимуществам акустической интенсивности следует отнести использование в качестве измеряемой величины энергетических характеристик акустического поля (вместо волновых характеристик, которые определяются на основе измерения уровней звукового давления). При измерении энергетической характеристики акустического поля волновые эффекты (в частности интерференция и дифракция в ближней зоне акустического поля) практически не оказывают влияния на результаты интенсивностных измерений.

Анализ процессов формирования активной и реактивной компонент комплексного акустического поля в низкочастотной области (основанный на результатах исследований) показывает, что именно благодаря применению метода акустической интенсивности можно обеспечить возможность проведения корректной метрологической аттестации акустической камеры в низкочастотном диапазоне (при проведении измерений на измерительных поверхностях, расположенных в ближней зоне поля).

Именно при использовании метода акустической интенсивности обеспечивается возможность корректных измерений характеристик комплексного акустического поля, формирующегося в ближней зоне в виде двух полей пульсаций давления: активного поля звуковых пульсаций давления и реактивного поля псевдозвуковых пульсаций давления. С помощью программного обеспечения вычисляются по отдельности характеристики поля звуковых пульсаций давления (т. е. активной компоненты поля) и псевдозвуковых пульсаций давления (т. е. реактивной компоненты поля).

При проведении аттестационных испытаний на основе метода акустической интенсивности в качестве критерия для классификации активной компоненты акустического поля, формирующегося в камере, используется скорость спада уровней интенсивности звука с расстоянием. Классификация акустического поля основывается на проверке соответствия этого критерия (а именно скорости спада уровней интенсивности звука (с расстоянием) «закону инверсии» (в области средних и высоких частот). В то же время в низкочастотном

диапазоне в качестве аттестационного критерия принято соответствие результатов интенсивностных измерений результатам расчёта (по формуле (7)) для скорости спада уровней интенсивности звука в акустическом поле дипольного источника звука. Как отмечено выше, в области низких частот около источника звука (в ближней зоне поля) формируется поле звуковых пульсаций давления, в котором скорости спада уровней колебательной скорости и давления вычисляются с помощью формул (7, а, б). При этом в поле акустического диполя скорость спада уровней активной компоненты интенсивности звука также соответствует закону обратных квадратов (т. е. формуле (7)).

Согласно результатам теоретического анализа и экспериментальных исследований, в активном поле звуковых пульсаций давления скорость спада уровней активной компоненты интенсивности звука с расстоянием (т. е. по мере удаления точки измерения от источника звука) вычисляется с помощью выражения: $\Delta L_I^{Ac} = 40 \lg(r_2 / r_1)$. В частности при удвоении расстояния (т. е., когда $r_2 / r_1 = 2$) величина $\Delta L_I = 12$ дБ.

Соответствие результатов измерения скорости спада уровней интенсивности активной компоненты акустического поля этой расчётной зависимости (для величины ΔL_I^{Ac}) используется в качестве критерия при проведении аттестации камеры с использованием интенсивностных измерений.

Таким образом, в ближней зоне активного поля звуковых пульсаций давления скорость спада уровней активной компоненты интенсивности (с расстоянием) значительно больше, чем в дальней зоне активного звукового поля, которое формируется в результате трансформации энергии активного поля звуковых пульсаций давления (которое возбуждается в ближней зоне) в энергию поля звуковых волн.

Для дифференциации формирующихся в камере акустических полей с различной физической природой (т. е. активных и реактивных полей) на основании результатов интенсивностных измерений определяется значение критериального индекса «давление – интенсивность» (F_{pl}). Этот индекс называют также индикатором поля, поскольку именно индекс F_{pl} позволяет оценить степень «реактивности» комплексного акустического поля.

В соответствии с изложенным, для проведения корректной метрологической аттестации заглушённой акустической камеры в низкочастотном диапазоне следует использовать метод акустической интенсивности, который позволяет измерить по отдельности акустические характеристики активной и реактивной компонент комплексного

акустического поля, формирующегося в камере (при работе образцового источника шума). Для классификации акустических полей в результате интенсивметрических измерений определяется скорость спада с расстоянием уровней активной компоненты интенсивности звука.

Раздельное измерение характеристик активной и реактивной компонент поля позволяет существенно ослабить влияние на результаты измерений систематической погрешности, обусловленной возбуждением в камере реактивных акустических полей. В ближней зоне источника звука возбуждается поле псевдозвуковых пульсаций давления (реактивная компонента комплексного акустического поля), а на первых собственных частотах объёма возбуждается чисто реактивное поле стоячих звуковых волн.

Заключение

Анализ современных методов метрологической аттестации заглушённых акустических камер (в соответствии с действующими стандартами [1, 3]) показывает, что при проведении аттестации в низкочастотном диапазоне возникают принципиальные метрологические проблемы. Эти проблемы связаны с проведением акустических измерений в ближней зоне комплексного акустического поля.

В соответствии с требованиями отраслевой методики, включённой в ТУ на изделия (электродвигатели) специального назначения, акустические измерения должны проводиться в третьоктавных полосах частот со среднегеометрическими частотами в диапазоне от 31,5 Гц до 10000 Гц. Причём измерения уровней звукового давления должны проводиться на расстоянии, не превышающем 1 м от источника звука.

В соответствии с методикой проведения аттестации акустических заглушённых камер [1, 3] и отраслевой методикой измерений камера может быть признана аттестованной в случае, когда акустическое поле, формирующееся в объёме камеры квалифицируется как «свободное» или «существенно свободное». Метрологическим признаком, на основании которого акустическое поле в камере квалифицируется как свободное поле, является соответствие скорости спада уровней звукового давления (по мере увеличения расстояния между источником звука и точкой измерений) «закону инверсии».

Однако «закон инверсии» в принципе может выполняться только в свободном звуковом поле, которое формируется в дальней зоне акустического поля. В то же время, в соответствии с отраслевой методикой, расстояние между источником звука и точками измерения не может превысить 1 м. В этом случае в низкочастотном диапазоне (когда $f \leq 100$ Гц) точки измерения расположены исключительно в ближней

зоне акустического поля, в которой «закон инверсии» не выполняется.

Таким образом, в диапазоне низких частот, при проведении аттестационных испытаний в соответствии с отраслевой методикой, камера, в принципе, не может быть аттестована, поскольку, аттестация возможна только при одновременном выполнении двух взаимоисключающих требований. А именно, измерительные поверхности должны располагаться в ближней зоне акустического поля и в то же время в ближней зоне должно сформироваться свободное акустическое поле, которое в действительности может сформироваться только в дальней зоне.

В действительности в ближней зоне формируется не чисто активное поле, а комплексное акустическое поле, в котором выделяются две компоненты (активная и реактивная), формирование которых обусловлено возбуждением в ближней зоне комплексного поля, соответственно, звуковых и псевдозвуковых пульсаций давления. При измерении акустической характеристики камеры реактивное поле псевдозвуковых пульсаций давления является источником систематических погрешностей измерений. Поэтому для проведения корректной метрологической аттестации камеры на низких частотах необходимо измерить не скорость спада уровней звукового давления в комплексном акустическом поле, а скорость спада уровней интенсивности для активной компоненты комплексного акустического поля.

В соответствии с результатами исследований процесса формирования комплексного акустического поля в объёме камеры для проведения корректной метрологической аттестации камеры в низкочастотном диапазоне необходимо использовать методику, обеспечивающую возможность раздельного измерения акустических характеристик двух компонент (активной и реактивной) комплексного акустического поля.

Согласно результатам экспериментальных исследований метрологической эффективности метода акустической интенсивметрии в низкочастотном диапазоне, на основе результатов измерений интенсивности могут быть вычислены характеристики двух компонент комплексного поля: поля звуковых и поля псевдозвуковых пульсаций давления. Т. е., соответственно, активной и реактивной компонент комплексного поля. Пульсации давления возбуждаются при отрыве пограничного слоя в межлопаточных каналах колеса вентилятора (образцового источника шума). В ближней зоне источника звука значения уровней интенсивности в реактивном поле псевдозвуковых пульсаций давления значительно больше значений уровней интенсивности в активном поле звуковых пульсаций давления.

Однако псевдозвуковые пульсации давления быстро затухают и уровни интенсивности реактивного поля быстро спадают с расстоянием (по экспоненциальному закону). Поэтому в дальнюю зону энергия реактивного поля псевдозвуковых пульсаций не передаётся. В то же время энергия поля звуковых пульсаций давления в дальней зоне трансформируется в энергию активного звукового поля и распространяется в виде звуковых волн.

В соответствии с методикой аттестации заглушённых камер, основанной на использовании метода акустической интенсивности, в области средних и высоких частот камера может быть признана аттестованной в случае, когда акустическое поле, формирующееся в объёме камеры квалифицируется как «свободное» или «существенно свободное». Метрологическим признаком, на основании которого акустическое поле в камере квалифицируется как свободное поле, является соответствие скорости спадания уровней активной компоненты интенсивности звука (по мере увеличения расстояния между источником звука и точкой измерений) «закону обратных квадратов».

В то же время для аттестации камеры в низкочастотном диапазоне необходимо в активном поле звуковых пульсаций давления измерить скорость спадания уровней активной компоненты интенсивности звука с расстоянием (т. е. по мере удаления точки измерения от источника звука). Причём измерения проводятся в ближней зоне поля. Аттестация камеры в низкочастотном диапазоне основывается на проверке соответствия результатов интенсивностных измерений для скорости спадания уровней активной компоненты интенсивности звука расчётным значениям, вычисленным с помощью выражения (7) для акустического поля дипольного источника звука (согласно [18]).

В соответствии с результатами экспериментальных исследований эффективности применения метода акустической интенсивности для проведения метрологической аттестации камеры в низкочастотном диапазоне, систематическая погрешность акустических измерений обусловлена возбуждением в объёме камеры реактивных акустических полей. В частности, в ближней зоне источника звука возбуждается реактивная компонента комплексного акустического поля в виде поля псевдозвуковых пульсаций давления. Кроме того, на первых собственных частотах камеры возбуждается чисто реактивное поле стоячих звуковых волн. Это поле возбуждается вследствие возбуждения в объёме камеры первых собственных мод колебаний этого объёма.

При проведении низкочастотных измерений уровней звукового давления невозможно измерить по отдельности характеристики активного и реактивно-

го полей, поскольку микрофон не может отличить динамическое воздействие в зависимости от физической природы акустического поля. Поэтому измеряются суммарные характеристики комплексного акустического поля. В то же время при использовании метода акустической интенсивности можно измерить по отдельности характеристики активной компоненты поля и реактивной компоненты поля. При этом устраняется влияние на результаты измерений характеристик активных акустических полей систематической погрешности, обусловленной влиянием реактивной компоненты поля.

В соответствии с изложенным, для проведения корректной метрологической аттестации заглушённых акустических камер в низкочастотном диапазоне (в особенности на частотах ниже 100 Гц) в обязательном порядке должен использоваться метод акустической интенсивности.

Выводы

При аттестации заглушённой акустической камеры метрологические проблемы связаны с проведением корректных акустических измерений в низкочастотном диапазоне. Эти проблемы обусловлены формированием в объёме камеры комплексного акустического поля, в котором реактивная компонента оказывает существенное влияние на результаты измерений, и чисто реактивного поля стоячих звуковых волн (при возбуждении первых собственных мод колебаний камеры).

В низкочастотном диапазоне в ближней зоне источника звука формируются акустические поля звуковых и псевдозвуковых пульсаций давления, которые квалифицируются, соответственно, как активная и реактивная компоненты комплексного акустического поля.

Для проведения корректной метрологической аттестации акустической камеры следует использовать методику, с помощью которой обеспечивается возможность раздельного измерения характеристик активной и реактивной составляющих комплексного акустического поля, формирующегося в объёме камеры. Именно при использовании акустической интенсивности обеспечивается возможность раздельного измерения акустических характеристик активной и реактивной составляющих комплексного акустического поля в низкочастотном диапазоне.

Аттестация камеры в низкочастотном диапазоне основывается на проверке соответствия результатов измерений скорости спадания уровней активной компоненты интенсивности звука (с расстоянием) с расчётными значениями, вычисленными для ближней зоны акустического поля дипольного источника звука [18].

К основным источникам систематических погрешностей при проведении аттестационных интенсивметрических измерений в камере (в низкочастотном диапазоне) следует отнести реактивные акустические поля. А именно: реактивную компоненту комплексного акустического поля, формирующегося в объёме камеры при работе образцового источника звука, и чисто реактивное поле стоячих звуковых волн, которое формируется в объёме камеры на её первых собственных частотах вследствие возбуждения первых собственных мод колебаний камеры.

Литература

- ГОСТ ISO 3745-2014 Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии по звуковому давлению. Точные методы для заглушённых и полузаглушённых камер. – Взамен ГОСТ 31273-2003 (ИСО 3745:2003). – Введ. 01.11.2015. – М. : Стандартиформ, 2015. – 97 с.
- ГОСТ Р ИСО 3744-2013 Акустика. Определение уровней звуковой мощности и звуковой энергии по звуковому давлению. Технический метод в существенно свободном звуковом поле над звукоотражающей плоскостью. – Взамен ГОСТ Р 51401 – 99 (ИСО 3744 – 94). – Введ. 05.12.2013. – М. : Стандартиформ, 2014. – 60 с.
- Biesel V. B., Cunefare K. A. A test system for free-field qualification of anechoic chambers // Sound and Vibration. – May, 2003. – P. 22 – 26.
- ISO 26101-2102, Acoustics – Test methods for the qualification of free field environments / ISO. – Geneva, Switzerland, 2012.
- Winker D., Stahnke B. The influence of changes in international standards on performance qualification and design of anechoic and hemi-anechoic chambers // International Conference «Inter-Noise 2016». – Hamburg, Germany, 2016. – P. 702 – 709.
- Rusz R. Design of a Fully Anechoic Chamber. Master's Degree Project TRITA-AVE 2015:36 // KTH Royal Institute of Technology. – Sweden, Stockholm, 2015.
- Снижение шума в зданиях и жилых районах. Глава 5 / Под ред. Г. Л. Осипова и Е. Я. Юдина. – М. : Стройиздат, 1987. – 558 с.
- Баженов Д. В., Баженова Л. А., Гладиллин А. В., Догадов А. А., Миронов М. А. Шумы и вибрации судовых вентиляционных систем и способы их снижения: монография. – СПб. : ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2009. – 178 с.
- Либерман М. Ю. Исследование некоторых механизмов генерации широкополосного шума при работе центробежных вентиляторов // Сборник трудов XVIII сессии Российского акустического общества. – Том II. – М. : ГЕОС, 2006. – С. 22 – 25.
- Чжен П. Отрывные течения / П. Чжен. – Т. 1. – М. : Мир, 1972. – 300 с.
- Хорошев Г. А., Петров Ю. И., Егоров Н. Ф. Борьба с шумом вентиляторов / Г. А. Хорошев, Ю. И. Петров, Н. Ф. Егоров – М. : Энергоиздат, 1981. – 144 с.
- Смоляков А. В. Шум турбулентных потоков: монография. – СПб. : ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2005. – 312 с.
- Ffowcs Williams J. F. Hydrodynamic noise. – London, Imperial College of Science and Technology, 1992.
- Mann III J. A., Tichy J. Acoustic intensity analysis: Distinguishing energy propagation and wave front propagation // J. Acoust. Soc. Am. – 1991. – V. 90. – P. 20 – 25.
- ГОСТ 30457-97 Акустика. Определение уровней звуковой мощности источников шума на основе интенсивности звука. Измерение в дискретных точках. Технический метод. – Введён впервые. – М. : Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 1998. – 15 с.
- Bree H-E. de, Svetovoy V. B., Raangs R., Visser R. The very near field. Theory, simulations and measurements of sound pressure and particle velocity in the very near field // Eleventh International Congress on Sound and Vibration. – RF, St. Peterburg. – 2004, July. – P. 2387 – 2394.
- Bies D. A. and Hansen C. H. Engineering Noise Control. Theory and Practice. – Third Edition. – London and New York : Spon Press, 2003.
- Crocker M. J., Price A. J. Noise and noise control. Monograph. – V. 1. – Chapter 1 and 4. – Cleveland, Ohio : CRC Press, 1975.
- Ginn K. B. Architectural Acoustics / K. B. Ginn. – Naerum, Denmark : Bruel&Kjer Publication, 1978. – Second Edition. – 170 с.
- Jacobsen F. Sound Intensity and its measurements // Fifth International Congress on Sound and Vibration, 1997. – Adelaide, South Australia.

Поступила в редакцию 19.04.2018

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»).

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

The article contains the results of theoretical analysis and experimental studies of metrological possibilities provided by the acoustic intensimetry method during the certification of an anechoic acoustic chamber in the low-frequency range. It has been discovered that during the certifica-

tion of the chamber in the low-frequency range the metrological problems are caused by the influence of systematic errors on measurement results. Systematic errors of measurements occur due to excitation of reactive acoustic fields in the chamber. In order to eliminate the systematic errors the separate measurements of characteristics of active and reactive acoustic fields shall be ensured. It has been defined that the acoustic intensimetry method provides the possibility to separately measure the characteristics of active and reactive components of the complex acoustic field. It has been demonstrated that the use of acoustic intensimetry ensures the elimination of influence of systematic errors on the results of measurements of the acoustic characteristic of the active component of acoustic field. It has been determined that the accurate metrological certification of anechoic acoustic chambers in the low-frequency range requires the use of acoustic intensimetry method.

Key words: metrological certification, anechoic acoustic chamber, low-frequency range, active and reactive components of complex acoustic field, active and reactive components of sound intensity, sound and pseudo-sound pressure pulsations, acoustic near-field zone, reactive standing-wave acoustic field, systematic errors of measurements.

References

1. GOST ISO 3745-2014 Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Precision methods for anechoic and hemi-anechoic chambers. – Instead of GOST 31273-2003 (ISO 3745:2003). – Introduced on 01.11.2015. – M. : Standartinform, 2015. – 97 p.
2. GOST R ISO 3744-2013 Acoustics. Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure. Engineering method for an essentially free field over a reflecting plane. – Instead of GOST R 51401 – 99 (ISO 3744 – 94). – Introduced on 05.12.2013. – M. : Standartinform, 2014. – 60 p.
3. Biesel V. B., Cunefare K. A. A test system for free-field qualification of anechoic chambers // Sound and Vibration. – May, 2003. – Pp. 22 – 26.
4. ISO 26101-2102 Acoustics - Test methods for the qualification of free field environments / ISO. – Geneva, Switzerland, 2012.
5. Winker D., Stahnke B. The influence of changes in international standards on performance qualification and design of anechoic and hemi-anechoic chambers // International Conference «Inter-Noise 2016». – Hamburg, Germany, 2016. – P. 702 – 709.
6. Ruz R. Design of a Fully Anechoic Chamber. Master's Degree Project TRITA-AVE 2015:36 // KTH Royal Institute of Technology. – Stockholm, Sweden, 2015.
7. Noise reduction in buildings and residential areas. Chapter 5. / Edited by G. L. Osipov and E. Ia. Iudin. – M. : Stroyizdat Publishing House, 1987. – 558 p.
8. Bazhenov D. V., Bazhenova L. A., Gladilin A. V., Dogadov A. A., Mironov M. A. Noises and vibrations of marine ventilation systems and methods of reduction thereof: monograph / St. Petersburg : Central Research Institute named after academician A. N. Krylov, 2009. – 178 p.
9. Liberman M. Iu. Study of some mechanisms of broad-band noise generation during the operation of centrifugal fans // Collected proceedings of the XVIII session of the Russian Acoustic Society. – Vol. II. – M. : GEOS Publishing House, 2006. – Pp. 22 – 25.
10. Zheng P. Separated flows / P. Zheng. – Vol. 1. – M. : Mir Publishers, 1972. – 300 p.
11. Khoroshev G. A., Petrov Iu. I., Egorov N. F. Fan noise reduction / G. A. Khoroshev, Iu. I. Petrov, N. F. Egorov – M. : Energoizdat, 1981. – 144 p.
12. Smoliakov A. V. Noise of turbulent flows: monograph / St. Petersburg : Central Research Institute named after academician A. N. Krylov, 2005. – 312 p.
13. Ffowcs Williams J. F. Hydrodynamic noise. London, Imperial College of Science and Technology, 1992.
14. Mann III, J. A., Tichy J. Acoustic intensity analysis: Distinguishing energy propagation and wave front propagation // J. Acoust. Soc. Am. – 1991. – V. 90. – Pp. 20 – 25.
15. GOST 30457-97 Acoustics. Determination of sound power levels of noise sources using sound intensity. Measurement at discrete points. Engineering method – Introduced for the first time. – M. : Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, 1998. – 15 p.
16. de Bree H-E., Svetovoy V.B., Raangs R, Visser R. The very near field. Theory, simulations and measurements of sound pressure and particle velocity in the very near field // Eleventh International Congress on Sound and Vibration. – July 2004, St. Peterburg, RF. – Pp. 2387 – 2394.
17. Bies D. A. and Hansen C. H. Engineering Noise Control. Theory and Practice. – Third Edition: Spon Press, London and New York, 2003.
18. Crocker M. J., Price A. J. Noise and noise control. Monograph. V. 1, Chapter 1 and 4, CRC Press, Cleveland, Ohio, 1975.
19. Ginn K. B. Architectural Acoustics / K. B. Ginn. – Naerum, Denmark : «Brüel&Kjær» Publication, 1978. – Second Edition. – 170 p.
20. Jacobsen F. Sound Intensity and its measurements // Fifth International Congress on Sound and Vibration, 1997. – Adelaide, South Australia.

Vladimir Iakovlevich Gecha, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Deputy Director General, tel.: +7 (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»).