

Влияние внешних условий на звуковое давление в камере пистонфона в инфразвуковом диапазоне частот

А. В. Коньков, Д. В. Головин

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Российская Федерация, e-mail: akustika@vniiftri.ru, golovin@vniiftri.ru

Рассмотрены проблемы калибровки средств измерений инфразвуковых колебаний в атмосфере. Проанализировано влияние внешних условий – атмосферного давления, относительной влажности и температуры воздуха – на воспроизводимое в измерительных камерах пистонфона звуковое давление в диапазоне частот 0,001–250 Гц. Оценены погрешности расчёта звукового давления в измерительных камерах пистонфона при различных вариациях внешних условий. Приведены специальные требования к системе поддержания требуемых значений внешних условий.

Ключевые слова: инфразвуковой микрофон, первичный метод градуировки, пистонфон, инфразвуковое колебание давления, метрологическое исследование, коэффициент полнотры.

Введение. В настоящее время в РФ продолжается восстановление и модернизация поверочной схемы в области инфразвуковых измерений в воздухе. В период 2010–2020 гг. в России и за рубежом появились инфразвуковые микрофоны – средства измерений (СИ), применяемые при международном инфразвуковом мониторинге за соблюдением Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний, ведущемуся в частотном диапазоне 0,001–50 Гц и с верхним пределом динамического диапазона около 135 дБ отн. 20 мкПа [1–3]. В РФ были разработаны и в 2019 г. внесены в Госреестр СИ измерительные эталонные дифференциальные конденсаторные микробарометры К-304-АМ1И (диапазон частот 0,003–63 Гц) и калибратор переменного давления ТАВГ.422956.001 для воспроизведения заданного инфразвукового давления в диапазоне частот 0,01–20 Гц для поверки и калибровки инфразвуковых преобразователей и микрофонов (рабочих СИ). В 2018 г. в Национальной лаборатории Sandia (Калифорния, США) были успешно проведены испытания трёх инфразвуковых сенсоров ISGM-03М (вариант К-304-АМ1), изготовленных в г. Новосибирск. Эти сенсоры (инфразвуковые конденсаторные микрофоны) оказались менее восприимчивы к изменению внешних условий, чем зарубежные аналоги, выполненные на основе барометрической коробки. Указанные устройства составляют нижнее и среднее звенья поверочной схемы в области инфразвуковых измерений в воздухе.

Необходимо разработать верхнее звено поверочной схемы, состоящее из лабораторного эталонного микрофона и прибора для первичной (абсолютной) калибровки эталонных

микрофонов с частотным диапазоном 0,001–50 Гц и верхним пределом динамического диапазона до 135 дБ отн. 20 мкПа. Для калибровки эталонных инфразвуковых микрофонов в диапазоне частот 0,001–100 Гц можно использовать классический пистонфон [4–7]. При этом необходимо расширить частотный диапазон и уменьшить погрешность калибровки разработанного ранее пистонфона 3202, проведя коренную переработку основных узлов (подвижной системы двигателя и системы определения размаха колебаний поршня) и оснастить его современными радиоизмерительными приборами (вольтметром, генератором и частотомером).

Цель настоящей работы – теоретическая оценка влияния внешних условий (атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха) на погрешность расчёта звукового давления в диапазоне частот 0,001–250 Гц.

Описание пистонфона 3202. В 1960-е гг. во ВНИИФТРИ для калибровки инфразвуковых микрофонов в диапазоне частот 0,1–100 Гц разработан пистонфон 3202. Поршень пистонфона диаметром 20 мм приводится в движение электродинамической системой с подвижной катушкой и изменяет объём измерительной камеры. Система рассчитана на двойной ход поршня 1 мм. Ход поршня определяют с помощью микроскопа с погрешностью 0,5–1,5 % по крайним положениям светящейся метки, нанесённой на шток поршня и освещаемой осветителем. Зная поперечное сечение поршня и его размах, определяют изменение объёма камеры и по нему рассчитывают воспроизводимое в камере звуковое давление. Штуцер с водяным манометром перед проведением измерений позволяет проверить герметичность камеры

с помощью избыточного давления воздуха, накачиваемого резиновой грушей. Массивное основание пистонфона с вибродемпфирующей плитой уменьшает низкочастотные вибрации во время работы электродинамической системы.

Погрешность воспроизведения инфразвукового давления в измерительных камерах пистонфона составляет 1,5–3,0 % в зависимости от частоты и способа измерения размаха колебаний поршня, двигающегося по гармоническому закону. С помощью пистонфона калибруют (поверяют) эталонные лабораторные и рабочие измерительные микрофоны абсолютным (первичным) методом.

Внешние условия акустических измерений. Результаты калибровки микрофонов по известным коэффициентам зависимости от температуры и давления приводят к значениям, которые были бы получены при опорных внешних условиях (температуре воздуха $t=23\text{ }^{\circ}\text{C}$; атмосферному давлению $P_0=101,325\text{ кПа}=760\text{ мм рт. ст.}$; относительной влажности $RH=50\%$) согласно следующим стандартам: IEC 61094-1:2000 "Measurement microphones – Pt. 1: Specifications for laboratory standard microphones"; ГОСТ Р МЭК 61094-2-2011 «Микрофоны измерительные. Ч. 2. Первичный метод градуировки по давлению лабораторных эталонных микрофонов методом взаимности»; IEC 61094-4:1995 "Measurement microphones – Pt. 4: Specifications for working standard microphones".

В месте расположения акустической лаборатории ВНИИФТРИ годовые колебания атмосферного давления находятся в пределах 710–770 мм рт. ст. (94659–102658 Па), среднегодовое значение составляет примерно 747 мм рт. ст. (99592 Па). Помещения лаборатории, где размещены эталонные акустические установки, оборудованы прецизионным кондиционером, поддерживающим температуру воздуха $t=(23,0\pm 0,5)^{\circ}\text{C}$ и относительную влажность воздуха $RH=(50\pm 2)\%$.

Расчёт звукового давления в камере пистонфона. Чувствительность инфразвукового микрофона M_f на частоте f определяют по формуле

$$M_f = U_f / P_f,$$

где U_f – напряжение на выходе микрофона на частоте f ; P_f – звуковое давление в камере пистонфона на частоте f .

Звуковое давление в камере пистонфона с известными размерами создаётся поршнем, колеблющимся по гармоническому закону с определённым размахом. Процесс колебаний воздуха в закрытом объёме в общем случае является политропическим:

$$P_0 V^N = (P_0 + \delta p)(V + \delta V)^N, \quad (1)$$

где P_0 – первоначальное статическое давление воздуха в камере; V – объём камеры; N – коэффициент политропы; δp – переменное звуковое давление; δV – переменный объём, создаваемый колебаниями поршня.

В случае малых возмущений формулу (1) можно разложить в ряд. Если отбросить члены ряда со степенью выше

двух, то для синусоидальных колебаний среднеквадратическое значение звукового давления P_{RMS} в камере пистонфона можно определить по формуле

$$P_{RMS} = \frac{C N P_0 S}{V} \frac{X}{2\sqrt{2}}, \quad (2)$$

где $C = kh/\sin(kh)$ – коэффициент волнового распределения звукового давления вдоль оси камеры; k – волновое число; h – высота камеры; S – площадь поперечного сечения поршня пистонфона; X – двойная амплитуда (размах) колебаний поршня.

В состав пистонфона 3202 входит несколько измерительных камер малого объёма (КМО), различающихся объёмом и создаваемым в них звуковым давлением. Отношение высоты рабочего объёма КМО к диаметру должно быть близким к единице для обеспечения более ровной частотной характеристики звукового давления в камере на частотах более 0,1 Гц [4]. Звуковое давление в камере зависит не только от внешних условий, но и от частоты колебаний, с которой связаны коэффициенты волнового распределения давления C и политропы N (равный показателю адиабаты на высоких частотах и единице – на низких).

Коэффициент политропы N рассчитывают по формуле [8, 9]:

$$N = 1 + (\gamma - 1)E,$$

где $\gamma = c_p/c_v$ – коэффициент адиабаты воздуха; c_p , c_v – удельные теплоёмкости воздуха при постоянных давлении и объёме соответственно; E – комплексная передаточная функция температуры.

Для цилиндрической камеры комплексную передаточную функцию температуры можно представить в виде

$$E = 1 - D \sum_m \sum_n \left(\frac{1}{N_{mn}} + \frac{2\pi f l^2}{\alpha} \frac{1}{N_{mn} M_{mn}} i \right)^{-1},$$

где $D = 8/\pi^2$; $m = 0, 1, 2, \dots$; $n = 0, 1, 2, \dots$; $N_{mn} = (m + 0,5)^{-2} x_n^{-2}$; x_n – n -й нуль функции Бесселя нулевого порядка; $l = V/S$ – отношение объёма V к площади S стенок камеры; α – коэффициент температуропроводности воздуха; $M_{mn} = [(m + 0,5)^2 \pi^2 + x_n^2 R^2] (2R + 1)^{-2}$.

Передаточная функция E является комплексной, поэтому коэффициент N политропы также является комплексной величиной, т. е. при изменении частоты будет наблюдаться сдвиг фазы колебаний.

Расчёт коэффициента политропы. Важным моментом расчёта данного коэффициента является размер суммируемого двойного ряда. Был выбран ряд 1000×1000 , поскольку дальнейшее увеличение размеров суммируемого двойного ряда в заданном диапазоне частот не приводит к существенному изменению результатов расчёта, но увеличивает временные затраты. Все стандартные справочные данные величин, характеризующих воздух, и их зависимость от температуры, влажности и атмосферного давления взяты из стандарта IEC 61094-2:2009.

Результаты расчёта модуля коэффициента политропы для КМО пистонфона при указанных выше опорных условиях

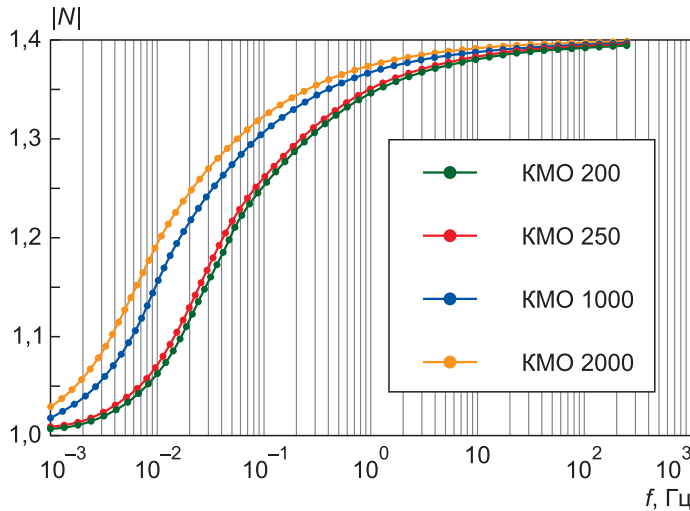


Рис. 1. Зависимость модуля коэффициента N политропы от частоты колебаний для всех КМО пистонфона

Fig. 1. Frequency dependence of the modulus of the polytrope coefficient N for all pistonphone couplers

представлены на рис. 1. Значение модуля коэффициента политропы изменяется от максимального значения 1,4 до минимального 1,0 для всех камер пистонфона в диапазоне частот 250...0,001 Гц. Чем меньше объём камеры, тем выше будет частота, при которой процесс деформации газа станет изотермическим.

Влияние внешних условий на звуковое давление в измерительных камерах пистонфона. Атмосферное (статическое) давление. Для расчётов использовали идеализируемую модель КМО: герметичная камера цилиндрической формы; все её стенки жёсткие; материал стенок имеет высокий коэффициент теплопроводности. Влияние внешних условий сводится к следующему: атмосферное давление учитывается только в момент герметизации КМО; средняя температура внутри КМО с некоторым пренебрежимо малым запаздыванием выравнивается с внешней температурой; средняя относительная влажность воздуха в КМО равна влажности воздуха в помещении в момент её герметизации без образования конденсата.

Для оценки влияния атмосферного давления на погрешность δ расчёта уровня звукового давления (УЗД) в КМО были заданы четыре значения статического давления $P_0 = 715; 730; 745; 760$ мм рт. ст. (95325, 97325, 99325, 101325 Па) при опорных значениях температуры и влажности. Расчёт выполняли для частот третьоктавного ряда в диапазоне 0,001–250 Гц.

На рис. 2, а за нулевой уровень $\delta=0$ принимали погрешность УЗД, рассчитанную для КМО 200 объёмом 201,3 см³ при опорных значениях внешних условий и давлении $P_0 = 760$ мм рт. ст. Для той же КМО, но при статических давлениях 745, 730 и 715 мм рт. ст. строили кривые $\delta(f)$. Аналогичные кривые получали и для остальных КМО, причём с

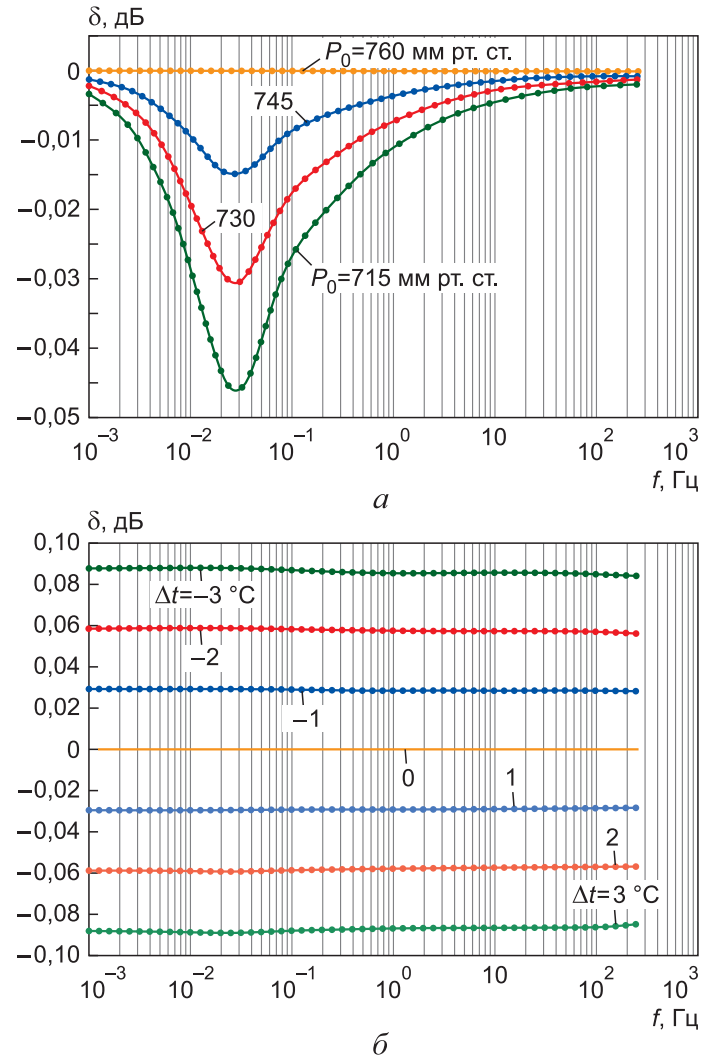


Рис. 2. Частотные зависимости погрешности расчёта звукового давления в КМО 200 пистонфона при опорных внешних условиях и изменениях атмосферного давления P_0 относительно опорного значения 760 мм рт. ст. (а) и температуры Δt относительно опорного значения 23 °С (б)

Fig. 2. Frequency dependences of error of sound pressure calculation for the pistonphone Coupler 200 at reference external conditions and changes of atmospheric pressure P_0 relative to the reference value of 760 mm Hg (а) and temperature Δt relative to the reference value 23 °С (б)

увеличением объёма КМО максимальные изменения кривых $\delta(f)$, оставаясь такими же по величине, сдвигались в сторону более низких частот. Это связано с тем, что отношение диаметра к высоте внутренней полости всех изготовленных КМО было одинаковым, равным единице.

В работах [10, 11] рассчитанный коэффициент политропы рассматривают как постоянную поправку к погрешности УЗД, полученную для формулы адиабатического процесса и называемую поправкой на теплопроводность или

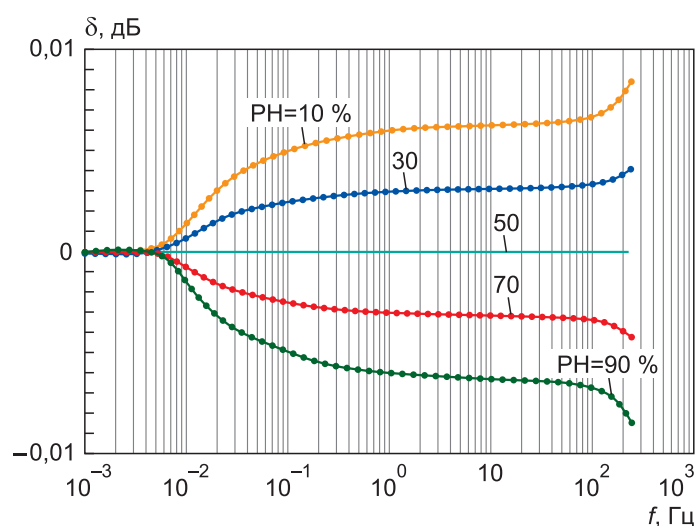


Рис. 3. Частотные зависимости погрешности расчёта звукового давления в КМО 2000 пистонфона при опорных внешних условиях и различного изменения влажности RH воздуха относительно опорного значения 50 %

Fig. 3. Frequency dependences of error of sound pressure calculation for the pistonphone Coupler 200 at reference external conditions and various changes of humidity air humidity RH relative to the reference value 50 %

термодинамической поправкой. Авторы этих работ предполагали, что поправка будет одинаковой, не зависящей от внешнего атмосферного давления. На самом деле, изменение коэффициента политропы (поправки) на каждой частоте рабочего диапазона (см. рис. 2, а) пропорционально изменению атмосферного давления. Частоты, при которых максимальны изменение УЗД в КМО пистонфона и скорость изменения коэффициента политропы, совпадают. На этих частотах для всех КМО при снижении давления с 760 до 715 мм рт. ст. (коэффициент влияния давления $K_P = 0,001$ дБ/мм рт. ст. = $0,0075$ дБ/кПа) максимальное изменение УЗД составляет 0,046 дБ. При прецизионных измерениях пистонфоном с погрешностью около 0,1 дБ (1,2 %) этой погрешностью пренебрегать нельзя. При небольших (в пределах 10 мм рт. ст. = 1,333 кПа) изменениях атмосферного давления его влиянием на расчётное давление в КМО можно пренебречь. Используя для каждой КМО заранее рассчитанную термодинамическую поправку для статических давлений 715, 730, 745 и 760 мм рт. ст., можно значительно упростить программное обеспечение пистонфона.

Относительная влажность воздуха. Для всех КМО было рассчитано влияние относительной влажности воздуха 10, 30, 50, 70 и 90 % на погрешность расчёта УЗД при опорных внешних условиях (рис. 3). За нулевой уровень принимали УЗД, рассчитанный для КМО 2000 объёмом $1967,1 \text{ см}^3$. Максимальные изменения кривых $\delta(f)$, построенных для остальных КМО, оставаясь такими же по величине, сдвигались в сторону высоких частот с уменьшением объёма КМО.

Влияние влажности стремится к нулю в диапазоне частот, где процесс деформации воздуха близок к изотермическому, и достигает максимального значения на высоких частотах. Максимальное изменение УЗД пропорционально изменению влажности воздуха и на частоте 100 Гц составляет $\pm 0,007$ дБ при изменении относительной влажности на ± 40 % относительно опорного значения 50 %. Коэффициент влияния относительной влажности воздуха на рабочей частоте не более 100 Гц составляет $K_{RH} = 0,00017$ дБ/%. Увеличение скорости изменения частотной зависимости УЗД от 50 до 250 Гц обусловлено коэффициентом волнового распределения, но это увеличение значительно меньше влияния коэффициента политропы и им можно пренебречь.

Таким образом, при $RH = 50$ % можно пренебречь влиянием относительной влажности на рассчитанный УЗД в КМО.

Температура воздуха. Камеры пистонфона изготовлены из металла, обладающего высокой теплопроводностью, следовательно, при изменении температуры в помещении будут изменяться средняя температура и статическое давление внутри КМО. Изменения температуры в помещении могут быть медленными (долговременными, в течение более нескольких часов) и быстрыми.

Рассмотрим долговременные колебания температуры воздуха. Такие изменения температуры не будут иметь существенного значения для калибруемого инфразвукового микрофона, так как спектр частот этих колебаний находится ниже частотного диапазона калибровки, но повлечёт изменение звукового сигнала, действующего на калибруемый микрофон, из-за изменения статического давления в КМО. На рис. 2, б показаны частотные зависимости погрешности расчёта УЗД в КМО при изменении температуры в пределах ± 3 °C относительно опорной температуры. На всех частотах коэффициент влияния температуры не превышает 0,03 дБ/°C. В герметичной замкнутой камере изменение давления при изменении температуры складывается из изменений статического давления и вызванного колебанием поршня переменного УЗД. Максимальное значение коэффициента влияния температуры переменной части $K_{TSPL} \approx 0,0025$ дБ/°C, т. е. им можно пренебречь. Из уравнения состояния идеального газа следует, что при изменении температуры газа в КМО на 1 °C статическое давление в замкнутой камере должно измениться на 340 Па (144,6 дБ отн. 20 мкПа). Для сравнения максимальное среднеквадратичное значение УЗД, получаемое в КМО 200, составляет 131,5 дБ отн. 20 мкПа, а в КМО 2000 – 111,4 дБ отн. 20 мкПа; максимальный размах колебаний, регистрируемый инфразвуковым сенсором, составляет 134,5 дБ отн. 20 мкПа. Если не учитывать этого изменения температуры, то мембрана инфразвукового микрофона внутри герметичной КМО будет смещаться от первоначального положения равновесия по статическому давлению и кроме переменного давления, возбуждаемого колеблющимся поршнем, будет регистрировать изменение статического давления в КМО, вызванного колебанием температуры окружающего воздуха. В практике инфразвуковых измерений для уменьшения описанного влияния температуры в КМО помещают капилляр,

связывающий полость камеры с окружающим воздухом. Этот капилляр определяет нижнюю границу частотного диапазона КМО (фильтр верхних частот) и вносит дополнительные фазовые искажения. Таким образом, классическая модель пистонфона с герметичной КМО перестаёт правильно работать и её надо заменить на другую модель, содержащую камеру с регулируемой утечкой.

Тепловые шумы (случай быстрых изменений температуры). В помещении с прецизионным кондиционером была проведена запись показаний электрического термометра с шагом 1 мин в течение 5 суток. Период между включением и выключением кондиционера для регулирования температуры в помещении составляет около 20 минут, т. е. наибольшим влияние таких колебаний должно быть на частоте около 0,8 мГц. С применением анализа Фурье получали температурный спектр и, соответственно, спектр теплового шума в измерительной камере (рис. 4). На частоте менее 4 мГц уровень теплового шума начинает превышать 95 дБ, т. е. соотношение сигнал–шум в диапазоне частот 1–4 мГц составляет менее 30 дБ и это приводит к значительному уменьшению точности измерений в этом диапазоне.

Замена системы поддержания температуры в помещении на систему с большей инерционностью позволяет уменьшить влияние изменений температуры окружающего воздуха на погрешность расчёта УЗД. В таком случае изменение температуры на $\pm 1^\circ\text{C}$ от опорной температуры приведёт к изменению расчётного УЗД на значение не более 0,01 дБ.

Дополнительно, помимо колебаний температуры в помещении, на тепловые шумы в КМО влияет радиационный нагрев пистонфона от прямого света (солнца, мощных ламп и прочих осветительных приборов) и от теплового излучения отопительной системы и нагревающихся при работе деталей пистонфона. Первая проблема решается путём исключения источников прямого света, вторая нивелируется конструктивными и техническими методами.

Закключение. Проанализировано влияние внешних условий на погрешность расчёта УЗД в КМО. Оценены УЗД, рассчитанные при опорных внешних условиях для модели полностью герметизированной измерительной камеры пистонфона. Установлено, что учёт влияния атмосферного давления в момент герметизации КМО можно значительно упростить, если разбить диапазон 705–770 мм рт. ст. (93992–102658 Па) на четыре опорных значения (как это сделано при изучении влияния атмосферного давления на УЗД в КМО). При этом можно пренебречь отклонениями давления ± 10 мм рт. ст. ($\pm 1,333$ кПа), температуры воздуха $\pm 1^\circ\text{C}$ и влажности $\pm 40\%$ относительно их опорных значений.

Медленно меняющиеся (более нескольких часов) колебания температуры воздуха в пределах $\pm 1^\circ\text{C}$ относительно опорного значения приводят к погрешности расчёта звукового давления не более 0,03 дБ, которую можно не учитывать при определении итоговой погрешности расчёта звукового давления в КМО.

Для уменьшения тепловых шумов в КМО пистонфона, вызванных колебаниями температуры воздуха в помещении, помещение должно иметь сильную инерционную систему

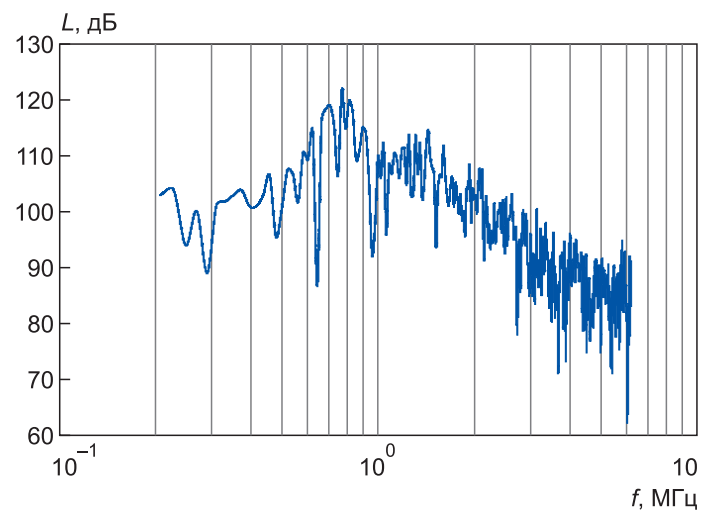


Рис. 4. Спектр L вызванного работой кондиционера теплового шума в КМО

Fig. 4. Example of a thermal noise spectrum L at a pistonphone Coupler caused by an air conditioner operation

поддержания температуры, которая была бы способна обеспечить медленно меняющиеся колебания температуры воздуха в помещении с периодом колебаний более 2–3 ч. При этом нельзя допускать прямого воздействия светового и теплового излучений на пистонфон.

Данные результаты будут востребованы при определении итоговой погрешности расчёта звукового давления в КМО пистонфона. Полученные данные можно проверить или уточнить при численном моделировании на основе уравнений Навье–Стокса процессов, протекающих внутри измерительной камеры пистонфона.

Список литературы

1. Merchant B. John, *Hyperion 5113/A Infrasond Sensor Evaluation*, United States: N. p., 2015, pp. 9–10. <https://doi.org/10.2172/1221711>
2. Slad George William, Merchant Bion J., *Chaparral Model 60 Infrasond Sensor Evaluation*, United States. <https://doi.org/10.2172/1431260>
3. Merchant Bion J., McDowell Kyle D., *MB3a Infrasond Sensor Evaluation*, United States. <https://doi.org/10.2172/1165050>
4. Коньков А. В. О методе пистонфона // Сборник научных трудов ВНИИФТРИ. 1975. Вып. 23 (33). С. 5–11.
5. Wen He, Longbiao He, Fan Zhang, Zuochao Rong and Shushi Jia, *A dedicated pistonphone for absolute calibration of infrasond sensors at very low frequencies*. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/2/025018>
6. Longbiao B. He, Wen He, Junhui H. Qin, Ping Yang, Bo Zhong, Feng Niu, *A Reference Infrasond Source with Low Distortion Based on Laser Pistonphone Technology*. <https://doi.org/10.1007/s12647-012-0034-9>

7. Eyup Bilgic, Enver Sadikoglu, Baki Karaboece, *Laser pistonphone as an alternative tool for microphone absolute calibration at low frequencies*. <https://doi.org/10.1117/12.468169>

8. Gerber H., *Journal of Acoustical Society of America*, 1964, vol. 36, pp. 1427–1434.

9. A. Svete, I. Bajsić, J. Kutin, *Investigation of polytropic corrections for the piston-in-cylinder primary standard used in dynamic calibrations of pressure sensors*.

<https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.03.019>

10. W. He, F. Zhang, L. B. He, Z. C. Rong, *Journal of Sound and Vibration*, 2014, vol. 335, pp. 105–114.

<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.09.030>

11. Zhang F., He W., He L. and Rong Z., *Journal of Sound and Vibration*, 2015, vol. 358. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.07.010>

References

1. Merchant B. John, *Hyperion 5113/A Infrasound Sensor Evaluation*, United States: N. p., 2015, pp. 9–10.

<https://doi.org/10.2172/1221711>

2. Slad George William, Merchant Bion J., *Chaparral Model 60 Infrasound Sensor Evaluation*, United States.

<https://doi.org/10.2172/1431260>

3. Merchant Bion J., McDowell Kyle D., *MB3a Infrasound Sensor Evaluation*, United States. <https://doi.org/10.2172/1165050>

4. Kon'kov A. V., *Collection of scientific proceeding of VNIIFTRI*, 1975, vol. 23 (33), pp. 5–11.

5. Wen He, Longbiao He, Fan Zhang, Zuochao Rong and Shushi Jia, *A dedicated pistonphone for absolute calibration of infrasound sensors at very low frequencies*.

<https://doi.org/10.1088/0957-0233/27/2/025018>

6. Longbiao B. He, Wen He, Junhui H. Qin, Ping Yang, Bo Zhong, Feng Niu, *A Reference Infrasound Source with Low Distortion Based on Laser Pistonphone Technology*.

<https://doi.org/10.1007/s12647-012-0034-9>

7. Eyup Bilgic, Enver Sadikoglu, Baki Karaboece, *Laser pistonphone as an alternative tool for microphone absolute calibration at low frequencies*.

<https://doi.org/10.1117/12.468169>

8. Gerber H., *Journal of Acoustical Society of America*, 1964, vol. 36, pp. 1427–1434.

9. A. Svete, I. Bajsić, J. Kutin, *Investigation of polytropic corrections for the piston-in-cylinder primary standard used in dynamic calibrations of pressure sensors*.

<https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.03.019>

10. W. He, F. Zhang, L. B. He, Z. C. Rong, *Journal of Sound and Vibration*, 2014, vol. 335, pp. 105–114.

<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2014.09.030>

11. Zhang F., He W., He L. and Rong Z., *Journal of Sound and Vibration*, 2015, vol. 358.

<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2015.07.010>

Дата поступления: 06.03.2020.

Дата принятия: 06.04.2020.

The influence of external conditions on sound pressure in the pistonphone at the infrasound frequency range

Anatoly V. Konkov, Dmitrii V. Golovin

Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering (VNIIFTRI),
Mendeleev, Moscow region, Russian Federation, e-mail: akustika@vniiftri.ru, golovin@vniiftri.ru

The influence of environmental conditions on a sound pressure reproduced by the primary method in the measuring chambers of the Pistonphone in the frequency range from 1 mHz to 250 Hz is estimated. Numerical estimations of influence of environmental conditions on sound pressure in pistonphone measuring chambers are given and special requirements to system of maintenance of required external conditions are specified.

Key words: infrasound microphone, primary method, pistonphone, infrasound pressure fluctuation, metrological analysis, polytropic coefficient.