

УДК 551.596

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДИНАМИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ МИКРОБАРОМЕТРОВ, ПРИМЕНЯЕМОЙ В МЕЖДУНАРОДНОЙ СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА

¹⁾Старовойт Ю.О, ²⁾Кунаков В.Г, ¹⁾Мартысевич П.Н

¹⁾*Отдел Международной системы мониторинга Организации по Договору
о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний, Вена, Австрия*

²⁾*Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

Описывается метод динамической калибровки микробарометра с использованием камеры переменного объема. Физическую основу метода определяют термодинамический процесс, протекающий внутри замкнутого объема, и соответствующие соотношения между изменением давления, объема и температуры, обусловленные перемещением поршня, установленного на входе камеры. Метод неоднократно успешно применялся [1, 2], однако представляется важным провести более полный анализ его физических особенностей. В статье дано описание термодинамического процесса внутри калибровочного объема, обсуждается необходимость учёта термодинамики и её влияние на точность калибровки.

Одним из обязательных технических требований Международной системы мониторинга (МСМ) к инфразвуковым станциям является определение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) микробарометров с погрешностью не более 5%. Для соблюдения этого требования необходимы достаточно точные методики динамической калибровки в частотной полосе пропускания датчика. Общеизвестным является способ динамической калибровки микробарометра, использующий изменение давления, инициированное изменением объема в специальной камере, акустически соединенной с микробарометром. Однако для проведения подобной калибровки и достижения необходимой точности требуются точные расчеты.

МЕТОДОЛОГИЯ

Цель калибровки – измерение с фиксированной точностью частотного отклика микробарометра на изменение давления известной величины. Предполагается, что микробарометр во время калибровки соединен с системой сбора данных, имеющей известную чувствительность в частотной полосе пропускания микробарометра. Блок-схема подобного калибратора показана на рисунке 1. Калибровочное устройство состоит из калибровочного объема (камеры) соединенной с движущимся “поршнем”, который вызывает изменения объема ΔV . Изменение давления, связанное с изменением объема, через короткий соединительный шланг передается на акустический вход микробарометра. Допустим, что синусоидальные колебания давления ΔP вызваны переменными объема ΔV . Так как процесс внутри камеры не является изотермическим, то внутри камеры должны иметь место и колебания температуры ΔT .

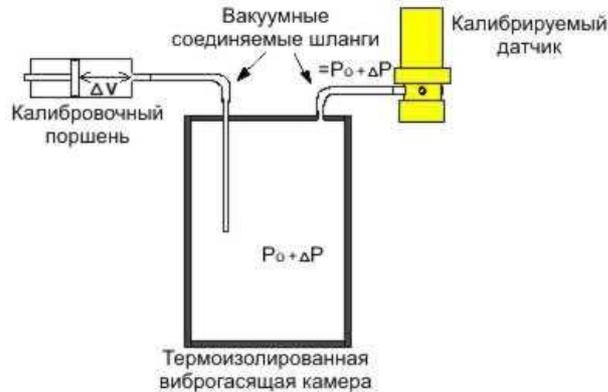


Рисунок 1. Блок-схема системы калибровки

Процесс внутри калибровочного объема описывается системой трех уравнений [3]:

$$\begin{aligned} PV &= RT \text{ or } R\Delta T = P\Delta V + V\Delta P \\ C_v\Delta T &= -P\Delta T + \Delta Q \\ -\frac{d(\Delta Q)}{dt} &= b\Delta T \end{aligned} \quad (1)$$

В (1) первое уравнение является уравнением состояния идеального газа, второе – уравнением первого начала термодинамики, а третье – описывает теплообмен между внутренним объемом камеры и внешней средой. При этом: R – газовая постоянная; P – атмосферное давление внутри камеры; Q – тепловой поток через стенки камеры; C_v – теплоемкость при постоянном объеме; β – коэффициент теплообмена между воздухом внутри камеры и внешней средой.

Принимая $\Delta V = \Delta V_0 e^{i\omega t}$, где ω – угловая частота синусоидальных колебаний внутри замкнутого объема, а ΔV_0 – амплитуда изменений объема, можно переписать систему уравнений (1) следующим образом:

$$\Delta P = \frac{P}{V} \cdot g \cdot \frac{(p + b / C_p)}{(p + b / C_v)} \Delta V, \quad (2)$$

где $g = \frac{C_p}{C_v} = 1.4$ – адиабатический коэффициент, а $p = i\omega$ – комплексная угловая частота. Таким образом, уравнение (2) описывает передаточную функцию колебаний давления в объеме V , вызванных небольшими колебаниями объема камеры ΔV .

Соответствующие колебания температуры внутри калибровочного объема могут быть описаны как:

$$\Delta T = -\frac{P_0}{C_v} \frac{1}{(p + b / C_v)} \cdot \Delta V \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) показывают, что колебания внутреннего давления и температуры сдвинуты по фазе относительно изменения объема и из-за зависимости от угловой частоты ω вызывают вариации различной амплитуды.

КОНСТРУКЦИЯ КАЛИБРОВОЧНОЙ КАМЕРЫ

Калибровочная камера должна быть сконструирована таким образом, чтобы колебания давления, инициированные изменением объема определённой амплитуды, имели также одинаковую и известную амплитуду в пределах полосы пропускания частот, определяемой номинальной АЧХ калибруемого микробарометра. Передаточная функция, описанная уравнением (2), показывает различие в амплитуде колебаний давления в зависимости от частоты. При проектировании подобных устройств необходимо установить ожидаемые значения двух угловых частот: $w_1 = \frac{b}{C_p}$ и $w_2 = \frac{b}{C_v}$, которые определяют форму передаточной функции. Основное затруднение вызывает вычисление коэффициента b , который характеризует степень теплообмена между воздухом внутри и вне камеры, то есть, показывает, насколько термодинамический процесс внутри камеры близок к адиабатическому или изотермическому процессам. Исходя из [3], коэффициент b может быть описан следующим образом

$$b = \frac{I \cdot S}{h}, \quad (4)$$

где I - теплопроводность материала стенок камеры; S - площадь поверхности камеры; h - толщина стенки. Для граничной частоты w_1 выражение (4) может быть переписано как

$$w_1 = \frac{b}{C_p} = \frac{I \cdot S}{h \cdot r V C_p}, \quad (5)$$

где $C_p = r V C_p$; C_v - удельная теплоёмкость при постоянном давлении, r - плотность воздуха, а V - объем камеры.

При кубической форме калибровочной камеры, когда знаменатель S/V равен $6/l_0$ (l_0 - ребро куба), граничные частоты w_1 и w_2 согласно (5) принимают вид:

$$w_1 = \frac{6 \cdot I}{h \cdot r C_p \cdot l_0}, \quad (6)$$

$$w_2 = \frac{6 \cdot 1.4 \cdot I}{h \cdot r C_p \cdot l_0} = \frac{8.4 \cdot I}{h \cdot r C_p \cdot l_0} \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) позволяют вычислить обе граничные частоты для выражения (2), и, следовательно, рассчитать наведённые колебания давления внутри камеры, вызванные небольшим изменением объема, инициированным поршнем. Однако значения w_1 и w_2 зависят не только от толщины стенок камеры и их материала, но также и от размера камеры. Если, например, стенки калибровочной камеры изготовлена из стали толщиной примерно $h = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ и $l_0 = 2 \cdot 10^{-1} \text{ м}$, то вычисленные граничные значения частоты будут равны

$$w_1 = 1.98 \cdot 10^2 \frac{\delta \dot{a} \ddot{a}}{\dot{n} \dot{a} \ddot{e}}, \quad w_2 = 2.78 \cdot 10^2 \frac{\delta \dot{a} \ddot{a}}{\dot{n} \dot{a} \ddot{e}}.$$

На рисунке 2 (черная кривая) показана форма нормированной передаточной функции.

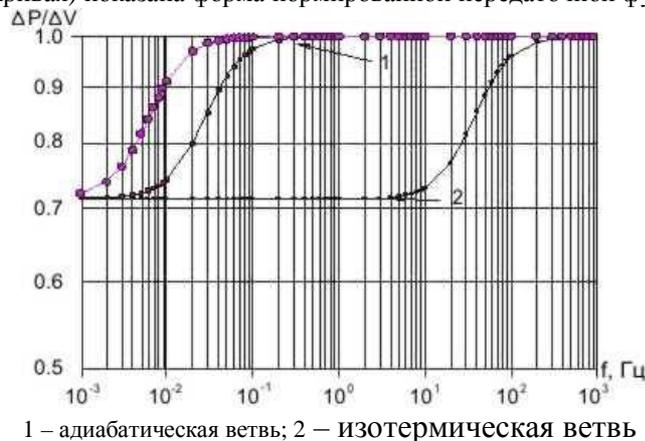


Рисунок 2. Нормированные передаточные функции отношения изменения внутреннего давления ΔP к колебаниям ΔV калибровочного объема

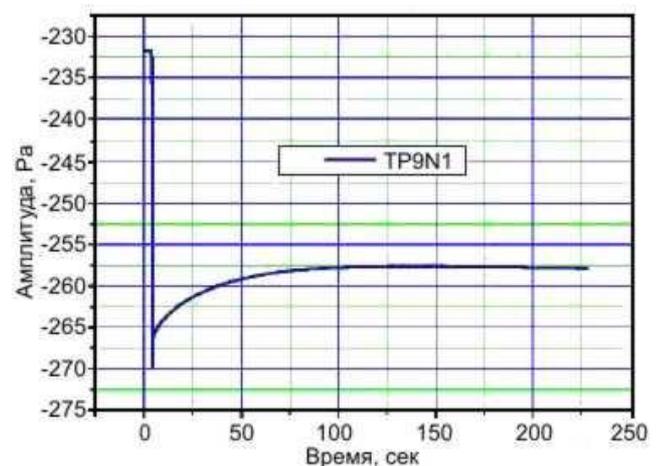
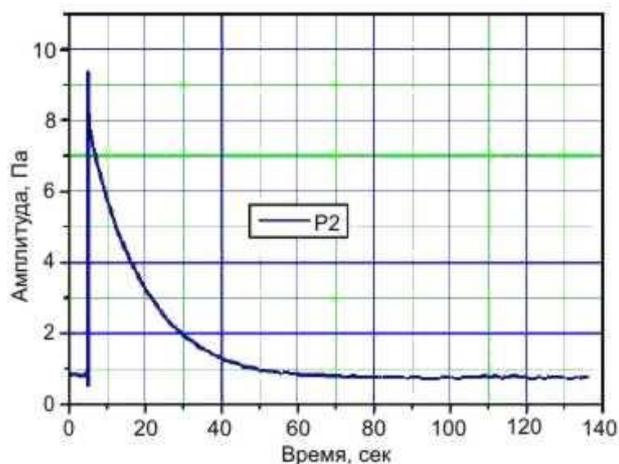
Термоизоляция стенок камеры материалами, имеющими низкую теплопроводность, сильно изменяет значения граничных частот. В этом случае процесс, протекающий внутри камеры, ближе к адиабатическому. Например, при использовании ~ 5 мм пробковой или ватной изоляции калибровочной камеры, значения w_1 и

w_2 определяются как: $w_1 = 1.5 \cdot 10^{-1} \frac{\delta \dot{\Delta} \ddot{\Delta}}{\dot{\Delta} \ddot{\Delta}}$, $w_2 = 2.1 \cdot 10^{-1} \frac{\delta \dot{\Delta} \ddot{\Delta}}{\dot{\Delta} \ddot{\Delta}}$. Передаточная функция для этого случая также показана на рисунке 2 (красная кривая). Обе кривые на рисунке 2 в полосе частот от 0,01 до 20 Гц не являются плоскими. Это означает, что равные изменения объема, инициированные поршнем, вызывают различные изменения давления, зависящие от частоты колебаний. Приведенный результат далек от идеала. Однако простое увеличение толщины изоляционного материала до 20 мм и небольшое увеличение объема калибровочной камеры до ~75 литров значительно улучшают ситуацию и приводит к форме передаточной функции, показанной на рисунке 2 розовыми точками. Как видно на рисунке 2, передаточная функция, показанная розовыми точками, еще не является полностью плоской в интересующей полосе пропускания и ослаблена примерно на 10% относительно граничной частоты 0,01 Гц. Установленный факт необходимо учитывать при калибровке.

Применение для калибровки изотермической ветви передаточной функции (нижняя часть черной кривой на рисунке 2) на первый взгляд кажется более привлекательной, так как эта ветвь вплоть до 8 Гц имеет практически плоскую форму. Однако ускоренный теплообмен между внутренним объемом и внешней средой (в данном случае I имеет большие значения) может вызвать нежелательные результаты, такое как, например, резкое изменение внешней температуры во время калибровочного процесса, что отражается на значениях наведённых колебаний давления и, следовательно, вносит значительные ошибки в результаты калибровки.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАЛИБРОВКИ

Вышеприведенный анализ позволил осуществить достаточно простое моделирование калибровочного процесса и сравнить его результаты с данными полевого эксперимента на примере одной из инфразвуковой станций Международной системы мониторинга. Прототип калибровочного устройства разработан в Институте геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан. Калибровочная камера изготовлена из стали толщиной 2 мм, имеет форму куба и объем примерно $0,05 \text{ м}^3$. Термоизоляция калибровочной камеры выполнена из двойного слоя шерстяного материала, наклеенного на стенки. Для дополнительной термоизоляции калибровочная камера помещена в специальную деревянную коробку. Шприц, присоединенный к калибровочной камере через короткий толстостенный резиновый шланг, использован для задания изменения объема воздуха ($\sim 10\text{-}15 \text{ см}^3$) и, следовательно, для моделирования изменения давления, описанного уравнением (2). Чтобы характер изменения объема в созданном прототипе имел ступенчатую форму, скорость движения поршня шприца была достаточно большой - шприц позволял вводить 10 см^3 воздуха в течение 10 миллисекунд. Такое короткое линейное нарастание входного сигнала обеспечило «плоский» спектр колебаний DV в пределах частотной полосы пропускания канала регистрации. Определение АЧХ канала выполнялось путем спектрального анализа временного отклика микробарометра на ступенчатый входной сигнал. Созданное устройство применено для калибровки микробарометра MB2000 (DASE, Франция) на инфразвуковой станции IS31-Актюбинск летом 2004 г. Этот микробарометр имеет два выхода для измерения давления. Один из них характеризуется «плоской» АЧХ в полосе частот от 0,01 Гц до 8 Гц, чувствительностью 20 мВ/Па и описывается одним нулём и четырьмя полюсами согласно [4] (т.н. «отфильтрованный выход»). Второй выход имеет плоскую АЧХ вплоть до нулевой частоты с чувствительностью 1 мВ/Па (т.н. «открытый выход») и угловую частоту среза, равную 8 Гц, в высокочастотной области. Фактически угловая частота среза в высокочастотной области определяется моделью FIR (Finite Impulse Response) фильтров используемого аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и зависит от частоты отсчетов АЦП. На инфразвуковых станциях МСМ обычно используется частота отсчетов 20 Гц. Полученные экспериментальные импульсные отклики микробарометра MB2000 на ступенчатый входной сигнал показаны на рисунке 3 (а, б) для отфильтрованного и открытого выходов, соответственно.



а – отфильтрованный канал

б – открытый канал. Станция IS31- Актюбинск

Рисунок 3. Экспериментальный отклик микробарометра MB2000 на "ступеньку" давления

Как видно из рисунка 3, форма отклика на ступень давления значимо различна вследствие различных форм передаточных функций каналов. Проведено сравнение результатов полевой калибровки с номинальной АЧХ микробарометра, рассчитанной для термодинамического процесса, исходя из (2). Как следует из выражения (2), общий отклик канала на моделированный ступенчатый входной сигнал, описывающий изменение объема, может быть выражен следующим образом:

$$H_a(p) = H_n(p) \cdot \left[-\frac{P}{V} \cdot g \cdot \frac{(p+b/C_p)}{(p+b/C_v)} \right], \quad (8)$$

где $H_a(p)$ – фактический или измеренный отклик канала, основанный на спектральном преобразовании функции импульсного отклика; $H_n(p)$ – номинальная АЧХ канала, указанная в техническом паспорте микробарометра [4]. Член в квадратных скобках описывает искажение номинальной характеристики, вызванное термодинамическим процессом внутри калибровочной камеры (как это показано во втором разделе). Из уравнения (8) видно, что отклики $H_a(p)$ и $H_n(p)$ будут совпадать только в том случае, когда калибровочный объем создан таким образом, что вторым членом в произведении (8) для частотной полосы пропускания MB2000 можно пренебречь. Другими словами, угловые частоты $w_{1,2}$ должны находиться вне частотной полосы пропускания микробарометра. В таблице приведены точки полюсов и нулей для отклика $H_n(p)$, полученные для микробарометра MB2000.

Таблица. Микробарометр MB2000. Полюса и нули для функции отклика

№	Полюс		Нуль	
	Re	Im	Re	Im
1	-1.777E+02	-1.777E+02	0.0	0.0
2	-1.777E+02	-1.777E+02		
3	-6.280E-02	0.000E+00		
4	-2.0734E+02	0.000E+00		

Как видно из таблицы, в пределах полосы пропускания частот микробарометра MB2000 форма АЧХ в основном определяется точкой третьего полюса и одним нулем. Группа комплексных полюсов - $1.77E+02 \pm i1.777E+02$ и полюс - $2.0734E+02$, 0.0 отвечают в основном за формирование отклика в области высоких частот, когда датчик используется с частотой отсчетов АЦП выше 20 Гц. Данное упрощение позволяет представить уравнение (4) в виде

$$H_a(p) = \frac{p}{p + \Omega_3} \cdot \left[-\frac{P}{V} \cdot g \cdot \frac{(p+b/C_p)}{(p+b/C_v)} \right], \quad (9)$$

где Ω_3 – третий полюс из таблицы 1, равный $6,28E-02$.

Так как $H_a(p)$ в уравнении (9) имеет форму произведения двух полиномиальных функций, зависящих от p , очевидно, что моделирование может быть проведено с помощью последовательности двух рекурсивных фильтров во временной области [5]. Переход из аналоговой области комплексных частот p в z – плоскость дискретных данных, с интервалом квантования Dt может быть осуществлён путем стандартного z -преобразования, или иначе, билинейного преобразования [6]. Рекурсивный фильтр может быть рассчитан с помощью известной подстановки [6]

$$p = \frac{2}{\Delta t} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}, \quad (10)$$

где z^{-n} – оператор временного сдвига. Коэффициент n показывает кратность интервалов дискретизации, вовлеченных во временной сдвиг, со знаком, обозначающим направление сдвига, - вперед (плюс) или назад (минус). Например, $z^{-n} = \delta(t) = \delta(t - n\Delta t)$. Угловая частота w_i аналоговой системы (9) преобразовывается в дискретные значения w'_i в соответствии с выражением

$$w'_i = \tan\left(\frac{w_i \cdot \Delta t}{2}\right). \quad (11)$$

Подставляя (10) в (9) и заменяя $w_{1,2}$ и Ω_3 в соответствии с (11), получаем z -преобразование $H_a(z)$ из $H_a(p)$:

$$H_a(z) = \frac{Y(z)}{\tilde{O}(z)} = \frac{P}{V} \cdot g \cdot \frac{1-z^{-1}}{\left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} + \Omega'3 \right)} \cdot \frac{\left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} + \Omega'_1 \right)}{\left(\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} + \Omega'_2 \right)} \tag{12}$$

где $Y(z)$ – выход сигнала микробарометра, а $X(z)$ – изменение объема на входе, инициированное движением поршня, состыкованного с калибровочной камерой.

Из уравнения (12) можно получить следующую рекурсивную процедуру:

$$Y(n) = a_1 Y(n-1) + a_2 Y(n-2) + a_3 \tilde{O}(n) + a_4 \tilde{O}(n-1) + a_5 \tilde{O}(n-2), \tag{13}$$

где a_i – коэффициент рекурсивного фильтра, который преобразует входные изменения объема в моделируемый выходной сигнал микробарометра. Коэффициенты a_i могут быть преобразованы к виду

$$a_1 = \frac{2 - 157 \cdot 10^{-3} \tan \left(15 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{I g}{h r c_p l_0} \right)}{1.00157 \cdot \left[1 + \tan \left(15 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{I g}{h r c_p l_0} \right) \right]} \tag{14}$$

Обозначая знаменатель в (14) как $C_0 = 1.00157 \cdot \left[1 + \tan \left(15 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{I g}{h r c_p l_0} \right) \right]$, можно получить следующие коэффициенты:

$$a_2 = \frac{\tan \left(1.5 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{I}{h r c_p l_0} \right) - 1}{C_0}$$

$$a_3 = \frac{1 + \tan \left(15 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{I}{h r c_p l_0} \right)}{C_0} \tag{15) – (18)}$$

$$a_4 = -\frac{2}{C_0}$$

$$a_5 = -a_2 = \frac{1 - \tan \left(1.5 \cdot 10^{-1} \cdot \frac{I}{h r c_p l_0} \right)}{C_0}$$

Уравнение (13) позволяет легко вычислить импульсный отклик микробарометра MB2000 на изменение объема в виде ступенеобразной функции. На рисунках 4а и 4б показана форма отклика для отфильтрованного и открытого выхода, соответственно. При моделировании полагалось, что $w_1 = 2p \cdot 0.005 Hz$ и $w_2 = 2p \cdot 0.007 Hz$

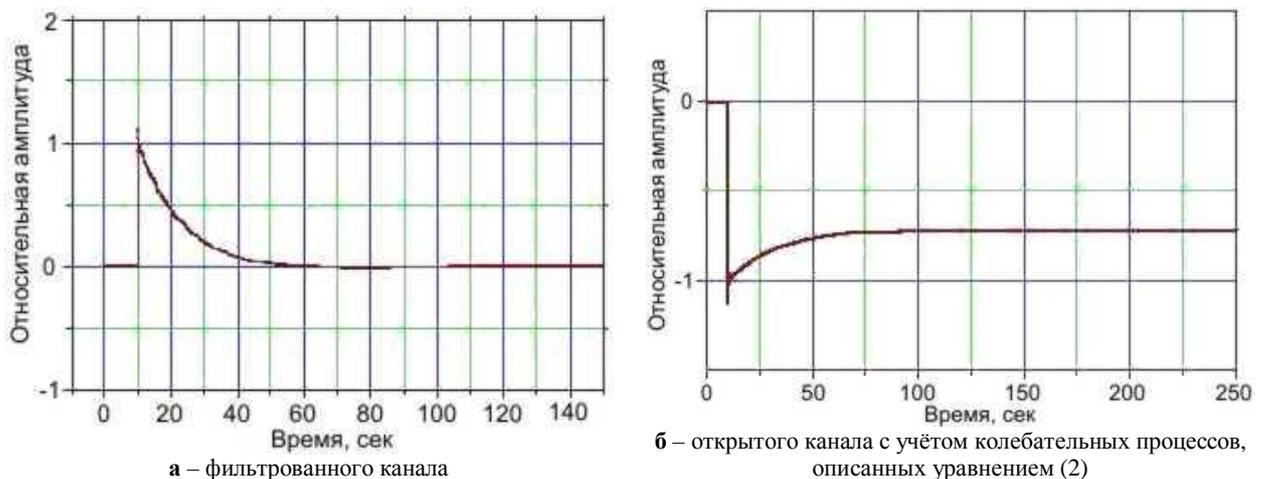


Рисунок 4. Вычисленный отклик микробарометра MB2000 на "ступеньку" давления для

Рисунки 3а, 4а и 3б, 4б достаточно похожи. Это означает, что примененный метод моделирования АЧХ канала достаточно хорошо отражает поведение реального микробарометра МВ2000 в процессе калибровки. Необходимо отметить, что, без учета передаточной функции, описываемой уравнением (2), отклик открытого выхода микробарометра должен был бы иметь форму, приведенную на рисунке 5.

Значительное различие между схожими формами отклика, приведенными на рисунках 3б (эксперимент) и 4б (расчет) относительно рисунка 5 показывает, что термодинамический эффект внутри калибровочного объема необходимо принимать во внимание. Следовательно, конструкция калибровочного объема должна быть выполнена таким образом, чтобы минимизировать искажения, вызванные термодинамическим эффектом. Наиболее простой способ оценки потенциального влияния неправильной конструкции (термоизоляции) калибровочного объема – это вычисление АЧХ отфильтрованного выхода микробарометра, основанное на Фурье-анализе временного отклика на «ступеньку» изменения объема. Традиционный подход состоит в вычислении спектрального отношения между выходным и входным сигналами, так как это обычно делают для оценки частотных характеристик. На рисунке 6 приведены две частотные характеристики, полученные расчетом с использованием двух различных наборов значений ω_1 и ω_2 .

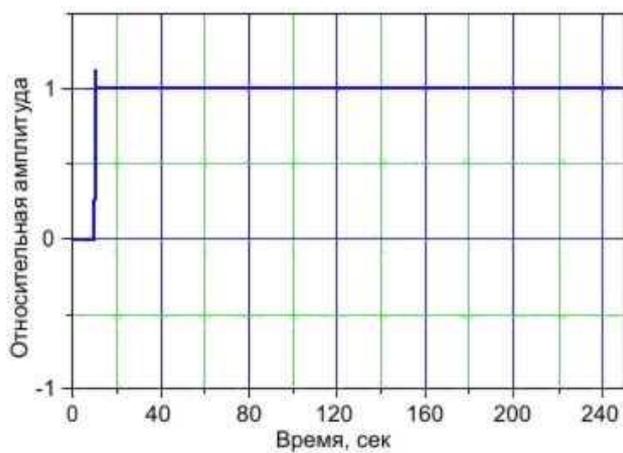
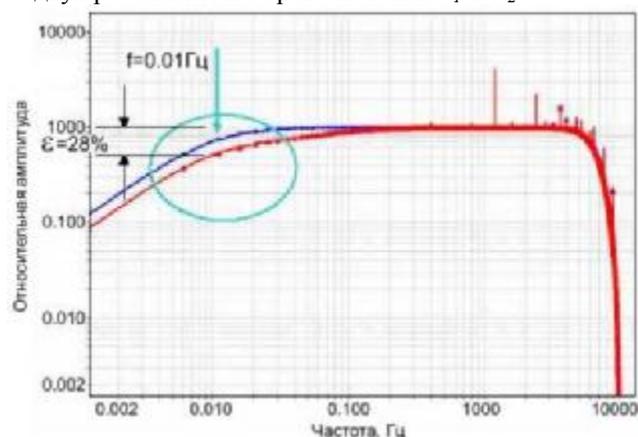


Рисунок 5. Вычисленный отклик открытого канала МВ2000 на "ступеньку" давления без учета колебательных процессов, описанных уравнением (2)



Кривые: голубой цвет - $\omega_1=0.0314$ рад/сек и $\omega_2=0.044$ рад/сек; красный цвет - $\omega_1=0.314$ рад/сек и $\omega_2=0.44$ рад/сек.

Рисунок 8. Нормированная частотная характеристика фильтрованного канала МВ2000 при двух вариантах значений ω_1 и ω_2 .

Синяя кривая получена с использованием частот, взятых для вычисления отклика, представленного на рисунке 4а. Эта кривая вполне соответствует номинальной АЧХ микробарометра МВ2000. Кривая красного цвета является результатом оценок, сделанных для неправильной конструкции калибровочного объема - с ω_1 и ω_2 , уменьшенными до 1/10 значений, использованных для вычисления синей кривой $\omega_1 = 2\pi \cdot 0.05 \text{ Hz}$ и $\omega_2 = 2\pi \cdot 0.07 \text{ Hz}$.

Область наибольшего расхождения двух АЧХ выделена голубым эллипсом. Можно видеть, что вблизи нижней угловой частоты полосы пропускания канала, погрешность составляет приблизительно 28%, что значительно превышает требуемую точность калибровки. Резкие выбросы на частотах более 1 Гц свидетельствуют о том, что входной ступенчатый сигнал содержал компоненты на частотах выше Найквистовой частоты, которые из-за явления наложения частот попадали в рабочую полосу оценки АЧХ. Из рисунка 6 следует, что видимое искажение формы АЧХ микробарометра может потенциально являться не только результатом реальных изменений АЧХ датчика или АЦП, но и следствием неудовлетворительной термоизоляции калибровочной емкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При создании камеры для динамической калибровки микробарометров следует принимать во внимание термодинамический эффект, проходящий внутри замкнутого калибровочного объема. Этот эффект в данной работе описан посредством передаточной функции наведённых колебаний давления, вызванных малыми изменениями объема. Показано, что при использовании адиабатической ветви процесса требуется учитывать спад передаточной функции вблизи нижней границы полосы пропускания микробарометра МВ2000.

Игнорирование термодинамического эффекта процесса может вызвать искажение передаточной функции превышающее требуемую 5% точность калибровки (рисунок 6). Термоизоляция стенок калибровочной камеры или размещение камеры внутри дополнительного изолирующего объема является необходимым условием для удержания двух граничных угловых частот ω_1 и ω_2 вне рабочей полосы частот

микробарометра. Объем калибровочной камеры равный ~75 литрам по экспериментальным оценкам является достаточным для исключения искажений АЧХ, хотя это справедливо только для условий термоизоляции калибровочного объема, описанных в данной работе.

Благодарности. Авторы выражают свою признательность операторам станции IS31-Актюбинск за техническую поддержку эксперимента по полевой калибровке в августе 2004 г., а также благодарят доктора Паолу Кампус (ОДВЗЯИ/МСМ) за тщательный просмотр статьи, ценные замечания и предложения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kunakov, V Dynamic calibration of an Infrasound Data Acquisition System (MB2000 microbarometer and Aubrac digitizer) / V. Kunakov, P.Martysevich // Infrasound Technology.:Workshop, October 27 to 30, 2003, La Jolla, California, US. - http://12a.ucsd.edu/meeting/pdf/ITW_booklet.pdf
2. Alcoverro, B. Infrasound sensor dynamic calibration device / B. Alcoverro // Infrasound Technology Workshop aila-Kona, Hawaii, 12-15 November, 2001.- http://www.isla.hawaii.edu/assets/downloads/meeting_abstracts.pdf
3. Thermodynamics / Wark, Kenneth and Richards, Donald, 6th Ed. - McGraw-Hill, 1999.
4. Technical Manual of microbarometer MB2000. - Laboratoire de Gephysique, LDG France, December 1996.
5. Beauchamp, K. G. Signal processing / K. G. Beauchamp. - London: George Allen&Unwin LTD, 1973.
6. Kaiser, J. F. Design methods for sampled data filters / J. F. Kaiser // Proc.1st Annu. Allerton Conf. Circuit System heory, 1963. - P. 221 - 236.