

С. И. БАБКИН, канд. техн. наук, Г. В. ГРУША, канд. физ.-мат. наук,  
И. А. ДЕЛОВ, канд. техн. наук, Е. Г. ПРОШКИН, д-р техн. наук

## ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА АКУСТИЧЕСКИМ ЗОНДИРОВАНИЕМ ПО СДВИГУ ФАЗ

### Введение

На протяжении ряда лет специалистами по зондированию атмосферы разрабатывались методы дистанционного измерения влажности воздуха, основанные на применении акустической релаксации. В ходе таких разработок предлагались многочастотные амплитудные методы (с использованием акустических локаторов) [1] и двухчастотные амплитудные – с использованием системы радиоакустического зондирования [2], в которых использовалось различие поглощения энергии звуковых волн разных частот. Однако при интерпретации практических результатов измерений амплитудными методами были выявлены трудности, связанные с низкой точностью измерения влажности воздуха. Так, для приемлемой точности при трехчастотном акустическом зондировании требуются высокие звуковые частоты и их широкий разнос [1], а для повышения точности при двухчастотных амплитудных радиоакустических измерениях в турбулентной атмосфере, где сильное влияние оказывает нарушение поперечной когерентности акустических волн [2], требуется привлечение информации о структурных постоянных турбулентных флуктуаций температуры и скорости ветра. Поэтому в лаборатории зондирования атмосферы разрабатывается фазовый метод измерения атмосферной влажности, основанный на втором физическом эффекте, сопровождающем акустическую релаксацию в воздухе, а именно – на дисперсии скорости звука во влажном воздухе [3].

### Идея метода

Идея метода состоит в следующем. При одновременном излучении акустических волн двух частот  $f_1$  и  $f_2$  в ветреной атмосфере возникает различие фазовых скоростей этих волн  $C_1$  и  $C_2$ , которое на основе дисперсионных формул может быть записано в виде:

$$\Delta C = C_2 - C_1 = \frac{C_\infty^2 - C_0^2}{2(C - W)} \left( \frac{f_2^2}{f_p^2 + f_2^2} - \frac{f_1^2}{f_p^2 + f_1^2} \right), \quad (1)$$

где  $C$  – среднее арифметическое двух скоростей звука,  $W$  – скорость вертикального ветра,  $f_p$  – релаксационная частота влажного воздуха,  $C_0$  – скорость звука на частоте  $f \ll f_p$ ,  $C_\infty$  – скорость звука на частоте  $f \gg f_p$  [3]. Это различие приводит к набеганию разности акустических фаз на расстоянии  $Z$  от излучателя. Для случая вертикального двухчастотного акустического зондирования выражение для разности фаз акустических волн, регистрируемой фазометром экспериментальной установки, представляется в виде линейной суперпозиции разностей фаз, набегающих до отражения  $\Delta\varphi_1$  и после отражения  $\Delta\varphi_2$  акустических волн турбулентным слоем:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2, \\ \Delta\varphi_1 &= 2\pi Z \left( \frac{f_1}{C_1} - \frac{f_2}{C_2} \right), \\ \Delta\varphi_2 &= 2\pi Z \left( \frac{f_1 + f_{d1}}{C_1} - \frac{f_2 + f_{d2}}{C_2} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $f_{di} = 2f_i \cdot \frac{W}{C_i}$  – доплеровский сдвиг центральной частоты отраженной акустической волны под действием вертикальной скорости ветра  $W$ .

Применение в экспериментальной методике целочисленного преобразователя частоты  $f_1 \rightarrow mf_1 = f_2$  на выходе акустического приемника позволяет привести формулу для сдвига фазы к виду:

$$\Delta\varphi = 4\pi f Z \cdot \frac{\Delta C}{C^2} \left( 1 + \frac{2W}{C} \right), \quad (3)$$

где  $C = \sqrt{C_1 C_2}$ ,  $Z$  – высота зондирования.

Эффект влияния дисперсии скорости звука на разность акустических фаз, максимально выделенный при этом, предлагалось ранее взять за основу при двухчастотных радиоакустических измерениях влажности воздуха по разности фаз между доплеровскими сдвигами частот принимаемых радиосигналов [4].

При реально наблюдающихся вертикальных скоростях ветра (в конвективных потоках – меньше 1 м/с) в выражении (3) можно пренебречь поправкой на скорость ветра  $W/C \ll 1$ :

$$\Delta\varphi \approx 4\pi f Z \cdot \frac{\Delta C}{C^2}, \quad (4)$$

где  $\Delta C$  в формуле (1) не зависит от скорости ветра.

Величиной, устанавливающей связь разности акустических фаз (4) с атмосферной влажностью на основе разности скоростей звука (1) является релаксационная частота  $f_p$ , оцениваемая разными авторами на основе как теоретических расчетов, так и экспериментальных работ. Мы выбрали эмпирическую формулу [3]:

$$f_p = 3,06 \cdot 10^4 \cdot h^{1,3}, \text{ Гц}, \quad (5)$$

где  $h = \left( \frac{e}{p} \right) \cdot 100\%$  – молярная концентрация водяного пара,  $e$  – абсолютная влажность (парциальное давление водяного пара),  $p$  – атмосферное давление.

Для диапазона звуковых частот  $f = 1 - 20$  кГц и ряда выбранных пар частот (с коэффициентом кратности 2 и 4) были рассчитаны зависимости разности акустических фаз  $\Delta\varphi$  от относительной влажности

$H = \frac{e}{e_n} \cdot 100\%$ , где  $e_n$  – упругость насыщенного пара, набегающей в слое воздуха толщиной  $\Delta Z = 1$  м при различных значениях температуры воздуха. На рис. 1 приведены графики таких зависимостей для зондирующих частот 1 кГц и 4 кГц.

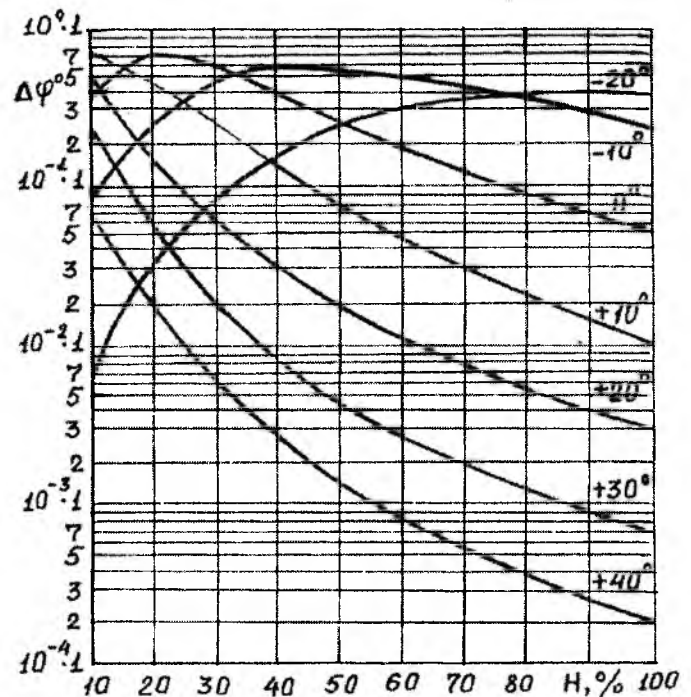


Рис. 1

### 3. Аппаратура и некоторые результаты экспериментов

Для экспериментального исследования возможности применения двухчастотного зондирования с целью дистанционного измерения влажности воздуха фазовым методом разработана и подвергается непрерывной модернизации аппаратура совмещенного зондирования, включающая в себя двухчастотный акустический локатор и одночастотную систему радиоакустического зондирования (РАЗ). Акустический локатор предназначался, в частности, для решения задачи экспериментального подтверждения факта существования фазовых сдвигов в атмосфере при ее двухчастотном зондировании. Некоторое сомнение вызывала возможность проведения фазовых измерений при таком зондировании, поскольку в данном случае в качестве рассеивателя акустических волн должна была служить сама неоднородная и турбулентная атмосфера. Эти сомнения возникли ввиду того, что при наличии случайных рассеивателей волн может разрушиться фазовая структура сигнала. Однако в ряде работ по дистанционному зондированию приводятся результаты исследований атмосферы, полученных путем анализа отражений от метеорных следов [6] и от температурно-ветровых неоднородностей атмосферы [1], причем в этих случаях информационным параметром отраженных сигналов выступала их фаза.

При акустическом зондировании формирование отраженного сигнала происходит путем рассеивания акустических волн на дифракционных решетках, причем такая решетка складывается из естественных температурно-ветровых неоднородностей атмосферы. Условием заметного рассеивания является условие Брэгга, требующее выполнения соотношения периода решетки с длиной рассеиваемой волны, равного 0,5. Поддержание такого соотношения возможно при наличии в атмосфере температурно-ветровых неоднородностей, масштаб которых соответствует условию Брэгга, что обеспечивает синфазное сложение мощности рассеиваемых акустических волн [1].

Как следует из теоретических предпосылок, для интерпретации фазовых сдвигов и измерения влажности воздуха при двухчастотном зондировании необходимо знание значений высоты зондирования и температуры воздуха для высоты, на которой осуществляется это измерение. Поэтому для экспериментов целесообразно привлечь средство для измерения скорости зондирующих акустических пакетов. Таким средством может стать аппаратура радиоакустического зондирования, которая хорошо комплексируется с аппаратурой акустического зондирования. По данным РАЗ можно также определить температуру воздуха, а для повышения точности измерения температуры воздуха при наличии в атмосфере вертикальных потоков необходимо выполнить совмещение во времени и в пространстве процессов акустического (АЗ) и радиоакустического зондирования (РАЗ). При таком совмещении зондирующий пакет акустических волн будет играть двойную роль: во-первых, при акустическом зондировании волновой пакет будет рассеиваться на температурно-ветровых неоднородностях атмосферы и, во-вторых, при радиоакустическом зондировании будет служить рассеивателем для электромагнитных волн. Такое совмещение дает возможность наиболее полного решения задачи корректировки данных температурного зондирования с помощью данных акустического зондирования.

Экспериментальные исследования возможности измерения влажности воздуха фазовым методом начались с подтверждения факта существования фазовых сдвигов с помощью двухчастотного акустического локаатора, имеющего следующие основные технические параметры:

частоты зондирования	$f_1 = 1,0278$ кГц и $f_2 = 4,1113$ кГц;
длительность зондирующих импульсов	70 мс;
период зондирования	2с и 4с;
электрическая излучаемая мощность ( в импульсе)	100 Вт;
способ работы	моностатический.

Схема акустического локаатора имеет типовую структуру с тем отличием, что усиленный в приемнике сигнал разделяется полосовыми фильтрами на два сигнала с частотами  $f_1$  и  $f_2$ , подаваемые затем на вход умножителя частот, который приводит эти частоты к рабочей частоте цифрового фазометра. Умножитель частот введен в устройство измерения фазовых сдвигов с тем, чтобы увеличить возникающие фазовые сдвиги до значений, позволяющих измерять эти сдвиги с необходимой точностью. Цифровой фазометр работает на частоте около 32 кГц, построен по схеме фазометра с постоянным временем измерения и позволяет производить измерения сдвига фаз через 100 мс с усреднением 1024 периода опорной частоты. Диапазон измеряемых сдвигов фазы составляет 0 – 360°. инструментальная погрешность измерения фазовых сдвигов (на линии с персональным компьютером) – 0,2°.

Экспериментальные исследования по регистрации сдвигов фаз проводились в различные сезоны года, чаще в погодных условиях, благоприятных для акустического зондирования. Полученные в ходе экспериментов данные измерений подвергались статистической обработке, в ходе которой рассчитывались средние значения, среднеквадратические отклонения сдвигов фаз и разности сдвигов фаз на соседних высотных уровнях, строились гистограммы распределений и т.д. Обработка данных показала, что средние значения фазовых сдвигов имеют устойчивый характер с дисперсией, зависящей от погодных условий. Распределение фазовых сдвигов приближается к нормальному закону. Для иллюстрации на рис. 2 представлены гистограммы распределения сдвигов фаз сигналов, отраженных с высоты 34 м (а) и 51 м (б) в мае 1995 г.

Зарегистрированные средние значения фазовых сдвигов качественно согласуются с расчетными значениями, приведенными на рис. 1. Например, в результате статистической обработки измерений сдвигов фаз в мае 1995 г. (данные приземных метеорологических измерений следующие: температура воздуха – + 20°С, относительная влажность – 60%, атмосферное давление – 102 кПа) получены разности фаз между соседними слоями, находящимися на расстоянии 17 м, близкие к значению  $\Delta\varphi = 1,52^\circ$ . При этом значение сдвига фаз, приходящееся на 1 м, равно  $\Delta\varphi / \Delta Z = 1,52/34 \cong 4,5 \cdot 10^{-2}$  град/м при его теоретическом значении  $\Delta\varphi / \Delta Z = 1,02 \cdot 10^{-2}$  град/м.

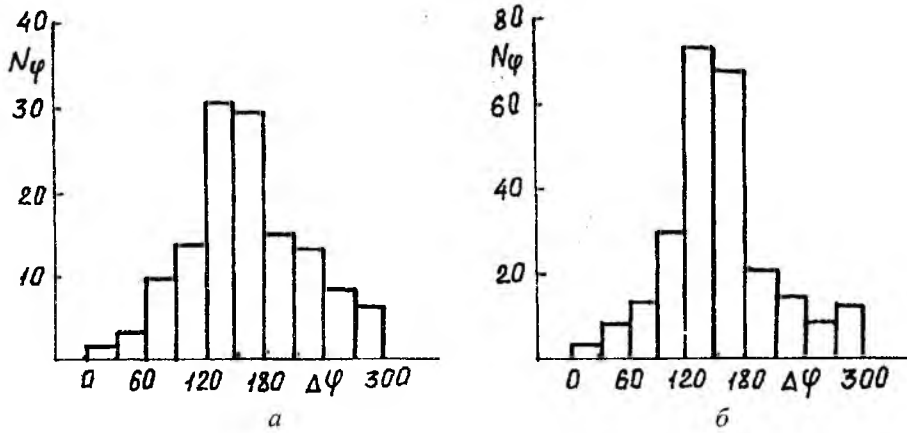


Рис. 2

### Уточнения для интерпретации результатов

Различие в значениях теоретических и полученных в результате обработки данных эксперимента сдвигов акустических фаз могут объясняться пространственно-временной изменчивостью полей температуры и скорости вертикального ветра, существенно влияющих на значение температуры в отражающем объеме атмосферы, поскольку в этих экспериментах не производились измерения температуры воздуха на высоте зондирования, а использовались приземные значения метеопараметров. Кроме того, при выводе формул (4 и 5), на основе которых были построены графики рис. 1, применялось предположение о медленной изменчивости акустического показателя преломления [5]. Поэтому вместо часто применяемого [1] геометрикооптического определения фазы акустической волны в виде

$$\varphi = 2\pi f \cdot \int_0^Z \frac{dZ'}{C(Z')}$$

использовалась приближенная формула для плоских волн в изотермической атмосфере  $\varphi = 2\pi f Z / C$ , то есть не учитывался реальный градиент скорости звука, создаваемый вертикальной изменчивостью метеорологических параметров. Это упрощение позволило решить задачу о восстановлении влажности воздуха в следующем явном виде:

$$h = \exp \left\{ 0,385 \ln \left[ \frac{\pi f Z (C_\infty^2 - C_0^2) (f_2^2 - f_1^2)}{C^3 \Delta \varphi} - \frac{f_1^2 + f_2^2}{2} \pm \left[ \left( \frac{f_1^2 + f_2^2}{2} - \frac{\pi f Z (C_\infty^2 - C_0^2) (f_2^2 - f_1^2)}{C^3 \Delta \varphi} \right)^2 - f_1^2 f_2^2 \right]^{1/2} \right] - 7,947 \right\} \quad (6)$$

при произвольном соотношении между релаксационной и зондирующими частотами. В настоящее время изучается влияние вертикальной изменчивости температуры воздуха и других метеопараметров, что позволит учесть градиент скорости звука и уточнить причины расхождения теоретических и экспериментальных данных.

Для правильной интерпретации результатов измерений полученные формулы были согласованы с применяющейся методикой измерений, состоящей в том, что измеряется разность фаз между двумя акустическими частотами, набегающая за одинаковый временной интервал стробирования  $\tau = 0,1$  с. При этом высоты отражающих слоев на двух частотах не совпадают, хотя их различие невелико. Например, при температуре воздуха  $t = +20^\circ \text{C}$ , когда  $\Delta C = 0,12$  м/с [3], различие высот равно:

$$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1} \approx \frac{\Delta C}{C} \approx 3,5 \cdot 10^{-4}$$

В этом легко убедиться, поскольку  $Z_2 = Z_1(1 + \Delta C / C_1)$  при условии  $\tau = \frac{2Z_2}{C_2} = \frac{2Z_1}{C_1}$ .

Преобразуем сдвиг акустических фаз к виду:

$$\Delta \varphi = A_1(1 - A_2 / A_1),$$

где  $A_1 = 4\pi(f_1 / C_1 - f_2 / C_2)Z_1$ ;  $A_2 = 4\pi f_2 \frac{Z_1 \Delta C}{C_1 C_2}$ .

Поправка к значению  $\Delta \varphi$  в формуле (4), где  $Z = Z_1$ , равна

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{f_2 \Delta C}{C_2 f_1 - C_1 f_2} = \frac{f_2 \Delta C}{(C_2 - m C_1) f_1}.$$

Здесь используется кратность излучаемых частот  $f_2 = m f_1$ . Так как практически в диапазоне 1-20 кГц целочисленная кратность может выбираться от  $m = 2$  до  $m = 10$ , то при тех же метеорологических условиях отношение  $A_2 / A_1$  находится в пределах от  $-7 \cdot 10^{-4}$  до  $-3 \cdot 10^{-4}$  и является незначительной поправкой к формуле (4).

При совмещении процессов акустического и радиоакустического зондирования технические параметры [7] выбирались так, чтобы с высокой точностью согласовать значения зондируемых высот:

$$Z_{RAS} - Z_{AS} = \left[ \tau(N - 1 - K/2) + 0,05 + \tau_1/2 - \tau_2/4 \right] C_{np},$$

где  $N$  – нумерация уровней РАЗ;  $K$  – нумерация уровней АЗ;  $\tau_2 = 0,032$  с – длительность измерения фазометром;  $\tau_1 = 0,01$  с – длительность измерения частотомером;  $C_{np}$  – приземная скорость звука.

При  $K = 2N - 1$  (акустических уровней высоты в два раза больше, чем радиоакустических)  $|Z_{RAS} - Z_{AS}| \approx 1$  м (при температуре 20°C). Таким образом, различие высот зондирования (на двух частотах, двумя системами – РАЗ и АЗ) не может оказать существенного влияния на точность измерения как разности фаз, так и влажности воздуха.

### Оценка аппаратурной и турбулентной погрешности метода

Для обоснования метода нами была вычислена аппаратурная погрешность и определено влияние атмосферной турбулентности на точность измерения влажности. Аппаратурная погрешность вычислялась на основе формулы, полученной при вариации параметров соотношения для восстановления влажности (6):

$$\frac{\sigma_h}{h} = 0,385 \left\{ \frac{R_1}{R_2} \left[ \left( \frac{\sigma_Z}{Z} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_f}{f} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{\Delta\varphi}}{\varphi} \right)^2 + 9 \left( \frac{\sigma_C}{C} \right)^2 \right] + f_2^2 A_2^2 \sigma_{f_2}^2 + f_1^2 A_1^2 \sigma_{f_1}^2 \right\}^{1/2},$$

где  $R_1, R_2, A_1$  и  $A_2$  – коэффициенты, зависящие от значений частот и высоты зондирования, сдвига фазы и температуры воздуха,  $\sigma_k$  – погрешность измерения  $k$ -го параметра. Графики аппаратурной погрешности

$$\sigma_H / H = \sigma_h / h + \sigma_p / p,$$

вычисленной для высоты 50 м и зондирующих частот 1 кГц и 4 кГц, приведены на рис. 3.

Один из важных вопросов, касающихся применимости рассматриваемого метода измерения влажности –

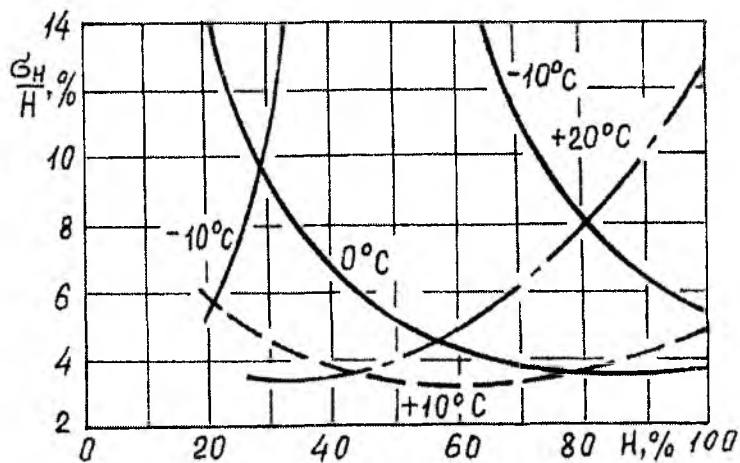


Рис. 3

оценка погрешности, возникающей под влиянием турбулентности. Нами рассмотрено три основных источника погрешности: накопление турбулентных деформаций фазового фронта акустических волн вдоль пути их распространения, турбулентные флуктуации скорости звука и увеличение среднеквадратического разброса сдвига фазы  $\langle \Delta\varphi'^2 \rangle$ , к которому приводит возникновение спектра частот в отраженном сигнале под влиянием турбулентного рассеяния.

Численные оценки погрешности, создаваемой первыми двумя факторами, и их корреляции получены нами с использованием математических методов и методов теории распространения ограниченного гауссова пучка в турбулентной среде со спектром Кармана, применявшихся в [5], для оценки турбулентной погрешности, создаваемой флуктуациями параметров атмосферы при радиоакустическом двухчастотном зондировании.

При этом использовались предположения:

- 1) малость турбулентных флуктуаций скорости звука  $C'$  и сдвигов акустических фаз  $\Delta\varphi'$ ;
- 2) малость корреляционных членов  $\langle \Delta\varphi' C' \rangle / \Delta\varphi C$ ;
- 3) флуктуации скорости звука и сдвигов акустических фаз имеют гауссово распределение.

Такие условия практически часто оправданы. Численные оценки на высотах 25 – 100 м при температуре воздуха от +20°C до +40°C и, кроме того, в конвективных условиях над сухой землей при умеренном ветре производились на основе эмпирических зависимостей структурных постоянных турбулентных флуктуаций температуры воздуха и скорости ветра от высоты [8]:  $C_T^2 = 2,9Z^{-4/3}$ ,  $C_V^2 = 0,04 + 0,33Z^{-2/3}$ , предложенных для описания сильной турбулентности. При таких метеорологических условиях среднеквадратичные флуктуации скорости звука и сдвигов акустических фаз, зависящие от структурной постоянной акустического показателя преломления [5], формируются, в основном, под влиянием флуктуаций скорости ветра и содержатся в пределах:

$$\langle C'^2 \rangle / C^2 \approx (1,5-2,9) \cdot 10^{-5}, \quad \langle \Delta\varphi'^2 \rangle / \Delta\varphi^2 \approx (1,1-2,1) \cdot 10^{-7},$$

$$|\langle \Delta\varphi' C' \rangle / \Delta\varphi C| \approx (1,3-2,5) \cdot 10^{-7}.$$

Определяемая этими факторами погрешность измерения молярной концентрации водяного пара оказалась ограниченной численными значениями:

$$\left| \frac{\langle h \rangle - h_0}{h_0} \right| < 2 \cdot 10^{-3} \%, \quad \frac{\sqrt{\langle (h - h_0)^2 \rangle}}{h_0} < 0,62 \%,$$

где  $h_0$  – невозмущенное турбулентностью значение молярной концентрации водяного пара.

Для оценки погрешности измерения влажности, возникающей под действием турбулентного рассеяния акустических волн в отражающем слое, можно вычислить турбулентные флуктуации на основе формулы двухчастотного зондирования (4), где зондирующая частота в отраженном сигнале рассматривается как флуктуирующая принимаемая частота. В этом случае

$$\langle \Delta\varphi \rangle = 2\pi Z \frac{\Delta C}{C^2} (\langle f \rangle + f),$$

$$\langle \Delta\varphi'^2 \rangle = \langle (\Delta\varphi - \langle \Delta\varphi \rangle)^2 \rangle = \left( 2\pi Z \frac{\Delta C}{C^2} \right)^2 \langle (f - \langle f \rangle)^2 \rangle,$$

поскольку турбулентные флуктуации скорости звука мы уже учитывали ранее. Вводя понятие эффективной среднеквадратичной ширины спектра [1]

$$\Delta f_c^2 = \langle (f - \langle f \rangle)^2 \rangle,$$

вычислим

$$\langle \Delta\varphi'^2 \rangle / \Delta\varphi_0^2 = \Delta f_c^2 / (4f_0^2),$$

где  $\Delta\varphi_0 = 4\pi \langle f \rangle Z \frac{\Delta C}{C^2}$  – набег фазы на центральной частоте  $f_0 = \langle f \rangle$ . На основе формулы (6), проводя статистическое усреднение, можно вычислить линейный и среднеквадратический сдвиги

измеряемых значений молярной концентрации водяного пара, воспользовавшись линеаризацией при малости флуктуаций сдвига фазы:

$$\frac{\langle h \rangle - h_0}{h_0} \approx 0,074 \frac{\langle \Delta\varphi'^2 \rangle}{\Delta\varphi_0^2} \gamma^2(h_0),$$

где  $\gamma(h_0) = \frac{(f_p^2 + f_2^2)(f_p^2 + f_1^2)}{f_p^4 - f_1^2 f_2^2}$ ;  $\frac{\sqrt{\langle (h - h_0)^2 \rangle}}{h_0} = 0,385 \frac{R_1}{R_2} \frac{\sqrt{\langle \Delta\varphi'^2 \rangle}}{\Delta\varphi_0}$  – ( $R_1$  и  $R_2$  – факторы, охарактеризованные нами ранее).

Окончательное значение доли погрешности измерения влажности двухчастотным акустическим зондированием по разности фаз под действием турбулентного рассеяния, полученное на основе эмпирических значений эффективной среднеквадратической ширины спектра на частотах 1 кГц и 4 кГц из [1] при низких шумах  $\Delta f_c / f_0 \approx 0,02$  численно оказывается близким к полученному под влиянием флуктуаций скорости звука и сдвига фаз вдоль трассы зондирования. Доля влияния турбулентного рассеяния

$$\frac{\langle h \rangle - h_0}{h_0} \approx 1,5 \cdot 10^{-3} \%, \quad \frac{\sqrt{\langle (h - h_0)^2 \rangle}}{h_0} \approx 0,4 \%$$

При значительном влиянии шумов на ширину доплеровского спектра принимаемого сигнала может возникнуть дополнительная погрешность измерения влажности, создаваемая шумовыми эффектами.

### Заключение

Изложенные результаты теоретических и экспериментальных исследований свидетельствуют о реальной возможности измерения атмосферной влажности двухчастотным вертикальным акустическим зондированием на основе эффекта дисперсии скорости звука во влажном воздухе. Действительно, во-первых, наличие дисперсионных разностей акустических фаз на двух частотах и их устойчивого среднего значения, а также возможность их измерения подтверждена экспериментально. Во-вторых, на основе приведенных результатов теоретических расчетов аппаратурная и турбулентная погрешности метода невелики, получены формулы, позволяющие их учесть. Наконец, разработан аппаратурный комплекс, содержащий двухчастотный акустический локаатор и систему РАЗ и позволяющий производить измерения фазовых сдвигов фазометром с последующей статистической обработкой значений их разностей между соседними высотными уровнями и измерения скорости звука на тех же высотах. Восстановление влажности воздуха на основе представленной теории возможно по полученной таким образом информации с учетом вертикальной изменчивости метеопараметров в дальнейших расчетах.

**Список литературы.** 1. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1986. 166 с. 2. Babkin S.I., Grusha G.V., Proshkin E.G. The measurement of the air humidity by two frequency radioacoustic sounding // 4th International Symposium on Tropospheric Profiling, Extended Abstracts, September 21 – 25, 1998, Snowmass, Colorado, USA, V.1, P. 25-27. 3. Кнезер Г. Релаксационные процессы в газах. В кн. Физическая акустика / Под ред. У.Мэзона. М.: Мир, 1968. Т.2, Ч.А. С.155-221. 4. Бабкин С.И., Груша Г.В., Васильченко Е.А. Двухчастотное радиоакустическое зондирование атмосферы для измерения влажности по сдвигу фаз // Тез. докл. 10 Всесоюзн. конф. по распротр. радиоволн. Харьков. ХПИ. 1990. Ч. 2. С. 311. 5. Бабкин С.И., Груша Г.В. Оценка погрешности определения влажности в турбулентной атмосфере по разности фаз при радиоакустическом зондировании // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т.8, №1. С. 60-66. 6. Жуков В.В. Погрешности фазового высотомера // Радиотехника. 1971. Вып. 16. С. 29-33. 7. Бабкин С.И., Делов И.А., Прошкин Е.Г. Комплекс аппаратуры для совмещенного зондирования пограничного слоя атмосферы электромагнитными и акустическими волнами // Радиотехника. 1998. Вып. 106-107. С.23 – 28. 8. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985. 197 с.

Харьковский государственный технический университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 5.02.2001