

С.И. Бабкин, Г.В. Груша

УДК 621.395:551.501.721

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА АМПЛИТУДНЫМ РАДИОАКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Приведены результаты численной оценки абсолютной погрешности измерения относительной влажности воздуха, обусловленной турбулентностью атмосферы, при вертикальном двухчастотном радиоакустическом зондировании.

Основными мешающими факторами в данном случае являются уменьшение масштаба поперечной когерентности в звуковой волне и действие горизонтального атмосферного ветра.

Оценки выполнены для кратных звуковых частот в диапазоне 1 – 13,6 кГц – при зондировании в атмосферном слое 50–200 м в условиях штиля и умеренного ветра. Относительная погрешность определения относительной влажности в пределах 10–100% не превышает 10%: в штилевых условиях при зондировании на частотах 3,4–6,8 и 6,8–13,6 кГц, а при скорости ветра $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ – на частотах 6,8–13,6 кГц.

Радиоакустическое зондирование [1] применяется в последнее время не только для измерения температуры воздуха и скорости ветра, но и для определения влажности воздуха. Наиболее известен метод дистанционного определения влажности атмосферы по значениям коэффициента поглощения акустической волны в воздухе [2, 3]. В основе метода лежит эффект возбуждения колебательных степеней свободы молекул многоатомных газов, приводящий к молекулярному поглощению акустической волны [1] и росту коэффициента поглощения звука.

Так как атмосферный пограничный слой довольно сильно турбулизован, представляет интерес поиск количественных оценок совместного влияния турбулентности и ветра на точность определения влажности амплитудным методом при двухчастотном вертикальном радиоакустическом зондировании [3].

Известно, что при радиоакустическом зондировании происходит фокусировка радиоволны «акустическим зеркалом» [1]. При этом мощность радиосигнала P_R в фокусе радиоприемной антенны в зоне дифракции Фраунгофера ($\lambda_e R/2 \gg \pi a_e^2$) имеет следующую зависимость от дальности R до зондируемой области нетурбулентной, безветренной атмосферы [1–3]:

$$P_R = \frac{A}{R^2} \exp \left[- \int_0^R \alpha(r) dr \right], \quad (1)$$

где $\alpha(r)$ – энергетический коэффициент затухания звука; λ_e – длина радиоволны; a_e – характерный линейный размер радиоантенны, величина A зависит от параметров аппаратуры.

Влияние локально однородной и изотропной турбулентности, в том числе при горизонтальном атмосферном ветре, как показано в ряде работ (например, [1]), может быть описано фактором $F(R)$, видоизменяющим зависимость усредненной мощности $\langle P_R \rangle$ принимаемого сигнала (1) от дальности до зондируемой области R .

Зависимость коэффициента молекулярного поглощения звука от высоты определяется распределением по высоте относительной влажности атмосферы [1], если пренебречь вариациями температуры и давления атмосферы. При условии почти постоянства относительной влажности, наблюдающегося в приземном слое [3], восстановление разности коэффициентов затухания звука $\Delta\alpha$ на частотах f_1 и f_2 может быть проведено по формуле:

$$\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 = \frac{1}{R} \ln \frac{\langle P_{R1} \rangle}{\langle P_{R2} \rangle} - \frac{1}{R} \ln \frac{F_1}{F_2} + \frac{1}{R} \ln \frac{A_2}{A_1}, \quad (2)$$

причем $\frac{1}{R} \ln \frac{A_2}{A_1}$ не зависит от метеорологических условий и составляет систематическую погрешность, а

$$\Delta\alpha - \Delta\alpha_m = \frac{1}{R} \ln \frac{F_1}{F_2} \quad (3)$$

представляет собой сдвиг разности коэффициентов поглощения звука, возникший под влиянием турбулентности и атмосферного ветра. (Здесь $\Delta\alpha_m = \frac{1}{R} \ln \frac{\langle P_{R1} \rangle}{\langle P_{R2} \rangle}$ – разность коэффициентов молекулярно-го поглощения звука при зондировании на частотах f_1 и f_2 в нетурбулентной безветренной атмосфере). Мощность радиоакустического сигнала в соотношении (1) принято определять по максимуму его амплитуды на данной высоте при настройке звуковой частоты f на условие Брэгга [1]

$$\kappa = 2k_e - q = 0,$$

где $k_e = 2\pi/\lambda_e$, $q = 2\pi/\lambda$, λ – длина акустической волны. Чтобы уменьшить влияние атмосферной турбулентности, при двухчастотном зондировании используется отношение мод распределений амплитуды, полученных в течение времени усреднения. Однако поскольку анализ большого количества амплитудных измерений показывает на чрезвычайное разнообразие гистограмм распределений амплитуд, в данной статье в качестве характерной величины выбрана разность коэффициентов поглощения звука, вычисленная по отношению средних максимальных мощностей при настройке на условие Брэгга на каждой высоте.

При условии слабого влияния флуктуаций влажности над сухой землей и некоррелированности полей температуры и скорости ветра структурная постоянная C_n^2 акустического показателя преломления для акустического пучка с расстоянием между лучами, меньшим длины трассы, равна [4]:

$$C_n^2 = \frac{C_T^2}{4T^2} + \frac{C_V^2}{C^2},$$

где C_T^2 и C_V^2 – структурные постоянные температуры и скорости ветра; C – скорость звука; T – абсолютная температура воздуха.

Получим турбулентно-ветровой сдвиг разности коэффициентов затухания звука для двух случаев: слабой ($C_n^2 \sim 10^{-8} \text{ м}^{-2/3}$) и сильной ($C_n^2 \sim 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-2/3}$) на высотах $Z = 100 - 200$ м турбулентности. Будем исходить из конкретных данных о высотной зависимости структурных постоянных в условиях, близких к штилевым, и при умеренном ветре. В [5] для конвективных условий предложено считать типичными высотные зависимости, полученные для атмосферного пограничного слоя при умеренном и сильном ветре:

$$C_T^2 = 2,9 Z^{-4/3}; \tag{4a}$$

$$C_V^2 = 0,04 + 0,33 Z^{-2/3}. \tag{4б}$$

В условиях, близких к штилевым, исходя из данных о C_V^2 и C_T^2 [1] над степью, можно считать типичной высотную зависимость

$$C_n^2 = \frac{C_T^2}{4T^2} = C_{n0}^2 Z^{-4/3}. \tag{5}$$

При оценке влияния на среднюю интенсивность принимаемого радиоакустического сигнала флуктуаций параметра Брэгга и деформаций фазового фронта акустической волны преобладающим при нормальных атмосферных условиях оказалось действие деформаций фазового фронта акустической волны, характеризующихся нарушением поперечной когерентности [6]. Используя конкретное представление фактора $F(R)$ [1] при нарушении поперечной когерентности акустической волны, получим зависимость турбулентно-ветрового сдвига разности коэффициентов затухания звука (3) от частоты зондирующего сигнала f , дальности до зондируемой области R и структурной постоянной акустического показателя преломления C_n^2 :

$$\Delta\alpha_{\text{ш}} = (\Delta\alpha - \Delta\alpha_m)_{\text{ш}} = \frac{1}{R} \ln \left(\frac{1 + R_0^2 \rho_{c2}^2}{1 + R_0^2 \rho_{c1}^2} \right), \tag{6}$$

при почти штилевых условиях,

$$\Delta\alpha_y = (\Delta\alpha - \Delta\alpha_m)_y = \frac{1}{R} \ln \left(\frac{1 + R_0^2 \rho_{c2}^2}{1 + R_0^2 \rho_{c1}^2} \right) - 2 \left(\frac{v_{\perp}}{C} \right)^2 \frac{R}{d_0^2} \left[\frac{1}{1 + R_0^2 \rho_{c1}^2} - \frac{1}{1 + R_0^2 \rho_{c2}^2} \right], \tag{7}$$

при умеренном поперечном ветре скорости v_{\perp} . Здесь $d_0 = \sqrt{2a^2 + a_e^2}$, a – характерный линейный размер акустической антенны (далее $a = 0,4$ м, $a_e = 0,6$ м),

$$R_0 = \frac{a_e a}{d_0} \sqrt{2(1 + Q_e Q)},$$

– эффективный дифракционный поперечный размер области взаимодействия радиопучка и акустического пучка [1], $Q_e = R / k_e a_e^2$ и $Q = R / q a^2$ – волновые параметры радиопучка и акустического пучка, ρ_c – длина поперечной когерентности акустической волны.

При оценке длины поперечной догерентности «акустического зеркала» радиоакустической системы в турбулентной среде неоднократно применялись результаты теории распространения оптических волн в случайно-неоднородных средах [1, 6] в коротковолновом приближении при определенных ограничениях на величину турбулентных флуктуаций [4]. Для расчета длины поперечной когерентности оптической волны, распространяющейся в турбулентной атмосфере, в случае турбулентных флуктуаций произвольной величины развит ряд методов [7]. Будем исходить из того, что акустическая антенна в плоскости апертуры создает акустическую волну с плоским фазовым фронтом [8]. Воспользуемся соотношением для длины поперечной когерентности световой волны, полученным [7] исходя из решения уравнения для функции когерентности в предположении гауссова источника световых волн с плоским фазовым фронтом на выходе оптической лазерной системы:

$$\rho_c^2 = \rho_0^2 \frac{3(1 + \Omega^2) + 4k\Omega}{3 + \Omega^2 + k\Omega}, \quad (8)$$

где $\rho_0 = (1,5C_n^2 q^2 R)^{-3/5}$ – длина поперечной когерентности плоской волны, вычисленная методом геометрической оптики; $\Omega = 1/Q$ – число Френеля передающей апертуры; $k = R / q \bar{\rho}$ – волновой параметр, определенный относительно длины когерентности ρ_0 плоской волны.

Условия применимости формулы (8) [7]:

$$R \gg \rho_c, \quad q \rho_c \gg 1.$$

Кроме того, предполагается малость продольного масштаба корреляции флуктуаций по сравнению с другими продольными масштабами задачи. Должны также выполняться условия применимости параболического уравнения для поля волны:

$$\frac{\lambda R}{l^2} \ll \left(\frac{l}{\lambda}\right)^2, \quad l \gg \lambda \quad (9)$$

и условие малости обратного рассеяния на неоднородностях.

В диапазоне акустических длин волн $\lambda = 0,025 - 0,34$ м (частот $f = 1$ кГц – 13 кГц) на высотах R , равных 50–200 м, перечисленные условия можно считать выполняющимися, если характерный размер неоднородностей искажающих фазовый фронт акустической волны $l \geq 10\lambda$.

Соотношение (8) позволяет учесть переход к сферическому волновому фронту акустической волны в зоне зондирования, когда $\Omega \ll 1$, и сильную турбулентность (наибольшие значения волнового параметра $k \approx 1,5 - 22$ на высотах 50–200 м соответствуют самой высокой частоте $f = 13,6$ кГц).

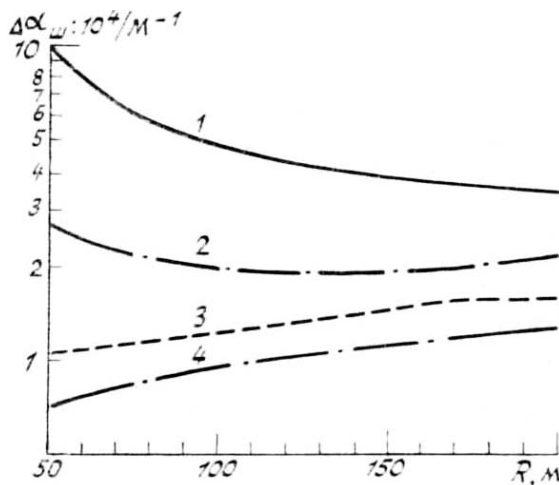


Рис. 1. Турбулентный сдвиг разности коэффициентов поглощения звука при почти штилевых условиях

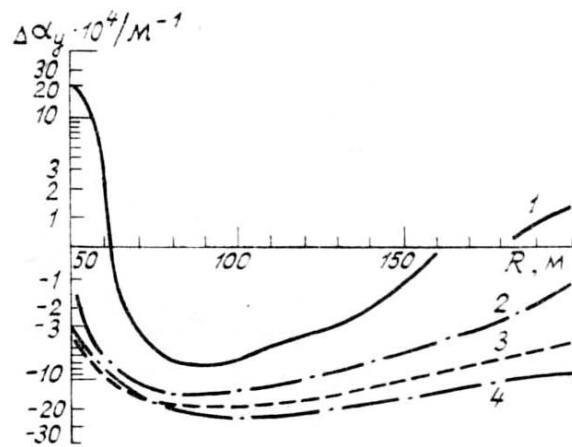


Рис. 2. Турбулентно-ветровой сдвиг разности коэффициентов поглощения звука при скорости ветра $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$

На рис. 1–2 для кратных пар частот в диапазоне $f = 1–13,6$ кГц (кривая 1– $f_1 = 6,8$ и $f_2 = 13,6$ кГц; 2 соответственно 3,4 и 6,8; 3–1,7 и 3,4 4–1,0 и 2,0 кГц) приведена высотная зависимость турбулентновентрового сдвига разности коэффициентов поглощения звука $\Delta\alpha_{ш}$ и $\Delta\alpha_y$ на высотах от 50 до 200 м при почти штилевых условиях (рис. 1) и при умеренном ветре $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ (рис. 2).

При оценке совместного влияния атмосферной турбулентности и ветра на точность определения влажности воздуха радиоакустическим методом мы исходим из эмпирических формул [9] зависимости коэффициента молекулярного поглощения звука от влажности воздуха, использованных при составлении таблиц стандарта поглощения звука в спокойной атмосфере ANSI S 1.26 = 1978. Атмосферные параметры были фиксированы при конвективных условиях: $p = 101,325 \text{ кПа}$, $T = 293,16 \text{ К}$ (p – атмосферное давление).

Линейное приращение разности коэффициентов молекулярного поглощения звука влажным воздухом $\Delta\alpha - \Delta\alpha_m$ (рис. 1–2), создаваемое турбулентностью и атмосферным ветром, определяет абсолютную погрешность измерения о относительной влажности h :

$$|\Delta\alpha - \Delta\alpha_m| = \left| \frac{\partial\Delta\alpha_m}{\partial h} \right| \sigma, \quad (10)$$

где производная $\frac{\partial\Delta\alpha_m}{\partial h}$ должна быть вычислена в нетурбулентной безветренной среде, исходя из зависимости [9] разности коэффициентов молекулярного поглощения звука от относительной влажности.

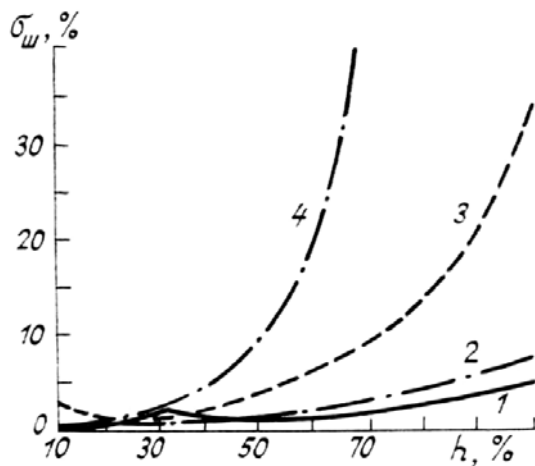


Рис. 3. Абсолютная погрешность измерения относительной влажности при почти штилевых условиях (высота 100 м)

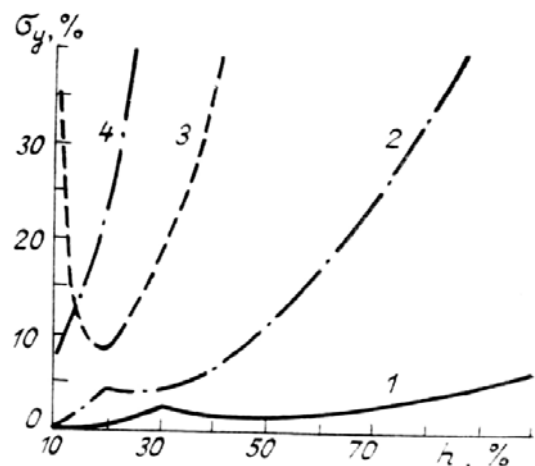


Рис. 4. Абсолютная погрешность измерения относительной влажности на высоте 100 м при скорости ветра $5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$

На рис. (3–4 обозначения те же, что и на рис. 1–2) приведены кривые зависимости абсолютной погрешности определения относительной влажности атмосферы при штиле $\sigma_{ш}$ и умеренном ветре σ_y от относительной влажности на высоте $Z_0 = 100$ м.

Для оценки значений $\sigma_{ш}$ и σ_y на других высотах Z из диапазона 50–200 м можно воспользоваться соотношениями

$$\begin{aligned} \sigma_{ш}(z) &= \left| \frac{\Delta\alpha_{ш}(z)}{\Delta\alpha_{ш}(z_0)} \right| \sigma_{ш}(z_0); \\ \sigma_y(z) &= \left| \frac{\Delta\alpha_y(z)}{\Delta\alpha_y(z_0)} \right| \sigma_y(z_0), \end{aligned} \quad (11)$$

следующими из формулы (10).

Исходя из соотношений (11) и графиков зависимости $\Delta\alpha_{ш}$ и $\Delta\alpha_y$ от высоты Z (рис. 1–2), можно прийти к выводу, что значения $\sigma_{ш}$ и σ_y на высотах 50–200 м при зондировании на кратных частотах в диапазоне 1–13 кГц по мере понижения значений частот становятся довольно велики. Рост значений погрешности с ростом относительной влажности h усиливается действием среднего горизонтального ветра, за исключением частот 6,8–13,6 кГц, на которых действие среднего ветра компенсируется сильной турбулентностью [1]. Известно, что одночастотное радиоакустическое зондирование эффективно при определении влажности только в нетурбулентной безветренной атмосфере [2]. На осно-

вании численных оценок, приведенных в данной статье, можно отметить преимущество двухчастотного метода, состоящее в том, что зондирование турбулентной атмосферы кратными частотами выше 3,4 кГц определяет относительную влажность с относительной точностью $(\sigma_{\text{ш}}/h) \lesssim 10\%$. Однако с ростом скорости среднего горизонтального ветра вплоть до $5 \cdot \text{с}^{-1}$ относительная погрешность $(\sigma_{\text{у}}/h) \lesssim 10\%$ только на самых высоких кратных частотах рассмотренного диапазона волн.

1. Каллистратова М.А., Кон А.И. Радиоакустическое зондирование атмосферы. М.: Наука, 1985. 195 с.
2. Орлов М.Ю., Юрчак Б.С. //Труды ИЭМ Госкомгидромета. 1985. № 38/121. С. 14–20.
3. Бабкин С.И., Максимова Н.Г., Панченко А.Ю., Прошкин Е.Г., Ульянов Ю.Н. //Тр. IX Всесоюзн. сими, по лазерн. и акустич. зондир. атмосф. Томск: ИОА СО АН СССР. 1987. Ч. 2. С. 145–148.
4. Татарский В.И. Распространение волн в турбулентной атмосфере. М.: ГИФМЛ, 1967. 548 с.
5. Kaimal J.C., Wyngaard J.C., Haugen D.A. et al. //J. Atmos. Sci. 1976. V. 33. № 11. P. 2151–2169.
6. Налбандян О.Г. //Изв. АН СССР ФАО. 1976. Т. 12. № 8. С. 877–880.
7. Зубев В.Е., Банах В.А., Покасов В.В. Оптика турбулентной атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1988. 270 с.
8. Ультразвук. /Под ред. И.П. Голямина.: Сов. Энциклопедия. 1979. С. 145–148.
9. Bernfeld В. //Journ. of the Audio Engineering Soc. 1980. V. 28. № 7/8. P. 521–524.

Харьковский институт радиоэлектроники

Поступила в редакцию
26 марта 1990 г.

S.I. Babkin, G.V. Grusha. Influence of the Atmospheric Turbulence on the Accuracy of Determining the Air Humidity by the Amplitude Radioacoustic Method.

This paper presents the results from the numerical estimation of the absolute error, caused by atmospheric turbulence when determining the air relative humidity by use of the vertical two-frequency sodar sounding. Decrease of the scale of transverse coherency in the sound wave and the effect of the horizontal atmospheric wind are the main distorting factors in this case. The estimations are made for the multiple sound frequencies in the range 1 to 13.6 kHz when sounding the atmospheric layer between 50 m and 200 m under windless and calm wind conditions. The relative error of evaluating the relative humidity within 10%–100% is shown to be not greater than 10% under windless conditions by sounding at frequencies 3.4 kHz–6.8 kHz and 6.8 kHz–13.6 kHz, and at the wind velocity $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ – for the frequencies 6.8 to 13.6 kHz.