

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

УДК 534.08

АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА В ПОМЕЩЕНИЯХ

© 2014 г. Н. Г. Канев

Акустический институт им. Н. Н. Андреева

117036 Москва, ул. Шверника, 4

E-mail: nikolay.kanev@mail.ru

Поступила в редакцию 17.09.2013 г.

Предложен метод определения температуры и влажности воздуха в помещениях при помощи системы излучателей и приемников звука, позволяющей найти скорость звука и время реверберации. Построены номограммы для определения температуры и относительной влажности воздуха по найденным значениям скорости звука и времени реверберации. Оценена требуемая точность измерения этих параметров.

Ключевые слова: температура, влажность, скорость звука, время реверберации.

DOI: 10.7868/S0320791914030083

Акустические методы широко применяются для измерения и контроля изменчивости различных параметров физических сред [1–5]. Суть этих методов заключается в измерении некоторой совокупности акустических характеристик среды, например, скорости звука, акустического сопротивления, коэффициентов затухания, параметров нелинейности и т.п., а также их девиаций, и последующем расчете значений соответствующего набора параметров среды, таких как плотность, температура, давление и т.п.

Для характеристики состояния воздушной среды во многих практических приложениях достаточно трех параметров: температуры, влажности и давления. При некоторых условиях, особенно в больших замкнутых объемах, распределение температуры и влажности может быть довольно неравномерным, поэтому для мониторинга параметров во всей контрольной области необходимо использовать большое количество датчиков. При этом датчики должны быть более или менее равномерно распределены в контрольной области, что не всегда может быть реализовано. Очевидно, что использование акустических методов измерения в некоторой степени решает эту проблему, поскольку наблюдение за распространением звуковой волны позволяет определить средние значения параметров на пути ее распространения. Например, по изменению скорости звука вдоль акустической морской трассы длиной несколько километров можно определить изменение средней температуры водного участка между излучателем и приемником звука [3], что также может быть реализовано в воздухе. В качестве второго примера приведем результаты лабораторного

эксперимента [6], в котором влажность воздуха, заключенного в замкнутом объеме, при поддержании постоянной температуры определялась по изменению времени реверберации.

Недавние исследования изменения акустики одного концертного зала в течение двух лет [7] показали, что коэффициент поглощения поверхностей помещения довольно стабилен во времени, а сезонные девиации времени реверберации на высоких частотах хорошо согласуются с изменением коэффициента звукопоглощения воздуха, зависящего от температуры и влажности. Можно предположить, что при неизменности акустических свойств поверхностей помещения измерение времени реверберации позволит определить коэффициент поглощения воздуха, зависимость которого от температуры, влажности и давления хорошо известна [8, 9].

Скорость звука в воздухе существенно зависит от температуры, при этом влияние влажности и давления значительно меньше [10, 11]. Простейший способ измерения скорости звука состоит в определении времени распространения звуковой волны от излучателя к приемнику, расстояние между которыми задано. Можно существенно увеличить точность измерения скорости звука при помощи автогенераторного метода, в котором приемник и излучатель образуют систему с обратной связью [3]. Фаза кольцевой передаточной функции данной системы однозначно связана со средней скоростью распространения звука вдоль трассы между излучателем и приемником.

Итак, время реверберации и средняя скорость звука в помещении связаны со средними по объему помещения температурой и влажностью. На

этой взаимосвязи основан предлагаемый в данной работе акустический метод измерения температуры и влажности воздуха в помещениях. Как показывают оценки [9, 11], время реверберации и скорость звука слабо зависят от давления, поэтому его влиянием на измеряемые параметры можно пренебречь, за исключением высоких значений относительной влажности воздуха (более 70%), при которых коэффициент поглощения воздуха заметно зависит от давления. В последнем случае давление может быть измерено непосредственно и учтено при расчете температуры и влажности по измеренным значениям времени реверберации и скорости звука. В связи с этим далее будем полагать давление в помещении постоянным.

Рассмотрим помещение произвольной формы, поверхности которого имеют постоянные акустические свойства. Разместим в помещении N излучателей и M приемников звука так, чтобы на пути распространения звука от всех излучателей к каждому приемнику отсутствовали какие-либо препятствия. Расстояние между n -м излучателем и m -м приемником обозначим l_{nm} . Таким образом, мы получили NM трасс распространения звука, вдоль которых можно отслеживать изменение его скорости. Для нахождения средней скорости звука акустические трассы должны быть равномерно распределены по объему, при этом не должно быть коротких трасс, длина которых l_{nm} значительно меньше характерного размера помещения. Если τ_{nm} — измеренное значение времени распространения звука от n -го излучателя к m -му приемнику, то скорость распространения по соответствующей трассе равна $c_{nm} = l_{nm} / \tau_{nm}$. Определим среднюю скорость звука в помещении следующим образом:

$$c = \frac{1}{NM} \sum_{n,m} c_{nm}.$$

Из возможных изменений параметров состояния воздуха наиболее существенное влияние на скорость звука оказывает изменение температуры. Если измеренная в помещении скорость звука изменилась на величину δc , то соответствующее изменение температуры при неизменной влажности составляет

$$\delta t = 2 \frac{t_0}{c_0} \delta c, \quad (1)$$

где c_0 и t_0 — начальные скорость звука и температура воздуха в помещении.

Система приемников и излучателей позволяет также измерить время реверберации помещения T . Время реверберации является глобальной характеристикой помещения и, как правило, не зависит от расположения излучателя и приемника, поэтому увеличение количества измерений приводит к повышению точности изме-

ряемого параметра. Определим время реверберации помещения как среднее по всем комбинациям пар излучатель—приемник:

$$T = \frac{1}{NM} \sum_{n,m} T_{nm},$$

где T_{nm} — время реверберации, измеренное n -м излучателем и m -м приемником.

Для расчета времени реверберации помещения применим формулу Эйринга [12], хорошо согласующуюся с лабораторными и натурными экспериментами:

$$T = 24 \ln 10 \frac{V}{c(-S \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4\eta V)}, \quad (2)$$

где V — объем помещения, S — площадь внутренних поверхностей, $\bar{\alpha}$ — средний коэффициент звукопоглощения поверхностей помещения, $\eta = \eta(t, h)$ — коэффициент поглощения звука в воздухе, зависящий от температуры t и относительной влажности воздуха h .

При изменении температуры и влажности воздуха в правой части (2) изменяется только скорость звука c и коэффициент поглощения η . Поэтому из (2) находим время реверберации в зависимости от этих параметров:

$$T = T_0 \frac{c_0}{c} \left(1 + \frac{1}{6 \ln 10} \delta \eta \frac{c_0 T_0}{c} \right)^{-1}, \quad (3)$$

где T_0 — начальное время реверберации, $\delta \eta$ — изменение коэффициента звукопоглощения. Изменение скорости звука c определяется по изменению температуры воздуха согласно (1), т.е. $c = c_0 + \delta c$. Если время реверберации изменяется на малую величину $\delta T = T - T_0 \ll T_0$, то из (3) находим изменение коэффициента поглощения:

$$\delta \eta = - \frac{6 \ln 10}{c_0 T_0} \left(\frac{\delta c}{c_0} + \frac{\delta T}{T_0} \right). \quad (4)$$

Отметим, что изменение времени реверберации не зависит от объема помещений, площади внутренних поверхностей и их звукопоглощающих свойств.

По измеренным значениям скорости звука и времени реверберации можно однозначно определить температуру и относительную влажность воздуха с использованием (1), (4) и зависимости коэффициента поглощения воздуха от температуры и влажности (аналитическое представление этой зависимости приведено в [9]). Также удобно номограммное определение искомых параметров. В качестве примера на рисунках (а) и (б) построены номограммы для нахождения температуры и влажности по измеренным значениям скорости звука (пунктирные линии) и времени реверберации (сплошные линии) на частотах 4000 или 8000 Гц для начального значения $T_0 = 1.5$ с при температуре $t_0 = 20^\circ\text{C}$ и относительной влаж-



Номограммы для определения температуры и относительной влажности воздуха в помещении по измеренным значениям скорости звука (пунктирные линии) и времени реверберации (сплошные линии) на частоте 4000 Гц (а) и 8000 Гц (б) при атмосферном давлении 101325 Па.

ности воздуха $h_0 = 40\%$. Очевидно, что вид номограмм зависит от начальных значений T_0 , t_0 , h_0 .

Пунктирные линии на рисунке, соответствующие равным значениям скорости звука, почти горизонтальны, поскольку скорость звука зависит в основном от температуры и слабо зависит от влажности. Из (1) следует, что для измерения температуры с точностью 1°C необходимо измерять скорость звука с точностью 0.6 м/с.

Обычная точность измерения времени реверберации при его значениях 1–2 с составляет 0.05 с [13]. Из рисунка (а) следует, что при измеренных значениях времени реверберации на частоте 4000 Гц, не превышающих 1.5 с, точность измерения относительной влажности составляет примерно

5%, что является достаточным для практических приложений. Однако при больших значениях времени реверберации его зависимость от влажности и температуры становится слабее, и поэтому увеличивается погрешность измерения. Точность измерения влажности повышается при измерении времени реверберации на более высоких частотах. Так, в приведенном примере на рисунке (б) на частоте 8000 Гц в интервале значений времени реверберации 1.5–2.0 с точность измерения влажности составит не менее 5%.

Итак, в настоящей работе предложен метод измерения температуры и влажности воздуха в помещении, усредненных по его объему. Непосредственно измеряемыми величинами являются скорость звука и время реверберации, по значениям которых определяются температура и влажность воздуха. Показано, что стандартные требования к точности измерения температуры 1°C и относительной влажности 5% могут быть выполнены при измерении скорости звука с точностью 0.6 м/с и времени реверберации с точностью 0.05 с. Для реализации метода достаточно одного излучателя и одного приемника звука, для более точного измерения акустических параметров необходима система из нескольких излучателей и приемников звука. Для этой цели в концертных и театральных залах могут быть использованы громкоговорители системы электроозвучивания, располагающиеся, как правило, в окрестности сцены, которые нужно дополнить микрофонами, размещенными по тыловой и боковым стенам зала. При наличии в зале системы виртуальной акустики [14], состоящей из микрофонов и громкоговорителей, равномерно распределенных по стенкам помещения, возможно также использование элементов этой системы для акустического измерения температуры и влажности воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев А.А., Химунин А.С. Ультразвуковой плотномер // Акуст. журн. 1962. Т. 8. № 3. С. 308–313.
2. Потехин Ю.Г., Чистяков Е.С. Акустический метод экспресс-анализа концентрации свободного газа в жидкостях // Акуст. журн. 1978. Т. 24. № 2. С. 243–248.
3. Фурдуев А.В. Акустический мониторинг изменчивости подводной среды (экспериментальная проверка новых методов) // Акуст. журн. 1978. Т. 24. № 2. С. 243–248.
4. Гурбатов С.Н., Демин И.Ю., Клемина А.В., Клемин В.А. Акустический анализ состава сыворотки крови человека // Акуст. журн. 2009. Т. 55. № 4–5. С. 496–505.
5. Потапов А.И., Павлов И.С., Лисина С.А. Идентификация нанокристаллических сред методами акустической спектроскопии // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 4. С. 558–567.

6. *Motegi T., Mizutani K., Wakatsuki N.* Acoustic hygrometer based on reverberation time measurement // *Japanese J. Appl. Phys.* 2012. V. 51. 07GB08, P. 1–5.
7. *Kanev N., Livshits A.* Acoustic evolution of Moscow conservatory Great Hall after renovation in 2011 // *Proceedings of 21th International Congress on Acoustics*, June 02–07, 2013, Montreal, Canada.
8. *Bass H.E., Sutherland L.C., Zuckerwar A.J., Blackstock D.T., Hester D.M.* Atmospheric absorption of sound: further development // *J. Acous. Soc. Am.* 1995. V. 97 (1). P. 680–683.
9. ISO-9613. Acoustics – attenuation of sound during propagation outdoors. ISO, Geneva, Switzerland, 1993.
10. *Wong G.S.K., Embleton T.F.W.* Variation of the speed of sound in air with humidity and temperature // *J. Acous. Soc. Am.* 1985. V. 77 (5). P. 1710–1712.
11. *Cramer O.* The variation of the specific heat ratio and the speed of sound in air with temperature, pressure, humidity, and CO₂ concentration // *J. Acous. Soc. Am.* 1993. V. 93 (5). P. 2510–2516.
12. *Kuttruff H.* Room Acoustics. London: Spon Press, 2000.
13. ISO-3382. Acoustics – measurements of the reverberation time of rooms with reference to the other acoustical parameters. ISO, Geneva, Switzerland, 2009.
14. *Woszczyk W.* Active acoustics in concert halls – a new approach // *Archives of Acoustics*. 2011. V. 36 (2). P. 379–393.L