

ВЫСОКОТОЧНЫЙ АКУСТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

В метеорологии, в технологических процессах на производстве и при решении других практических задач необходимо точно оценивать влажность воздуха. Недостатками применяемых в настоящее время методов определения содержания влаги в атмосфере являются либо низкая точность измерений, либо невозможность практической реализации измерителя в сложных условиях. В данной работе предлагается к использованию перспективный высокочувствительный бесконтактный фазовый метод. Сущность метода состоит в измерении разности фаз сигналов, как следствия разности скоростей распространения радио-, акустической волны или лазерного излучения в исследуемом объеме по отношению к эталонному. Так как, согласно [1], наибольшее взаимодействие волны со средой распространения наблюдается в диапазоне акустических волн, то для измерения влажности воздуха предлагается использовать фазовый метод в диапазоне акустических длин волн.

Измеритель влажности может быть реализован в двух вариантах: 1 – передатчик и приемник разнесены в пространстве на расстояние L друг от друга; 2 – передатчик и приемник не разнесены в пространстве, а используется отражатель на расстоянии $L/2$ от них. Второй вариант построения измерителя более предпочтителен. В нем акустическая волна распространяется в прямом и обратном направлении. При этом происходит компенсация систематических ошибок, связанных с движением воздуха в исследуемом объеме под действием ветра. Так как передатчик и приемник совмещены, то в них необходимо использовать остронаправленные антенны, причем для подавления излучения по боковым лепесткам диаграммы направленности (ДН) требуется осуществить развязку между передатчиком и приемником на уровне 30 дБ, что конструктивно легко реализуемо. Структурная схема измерителя влажности представлена на рис. 1.

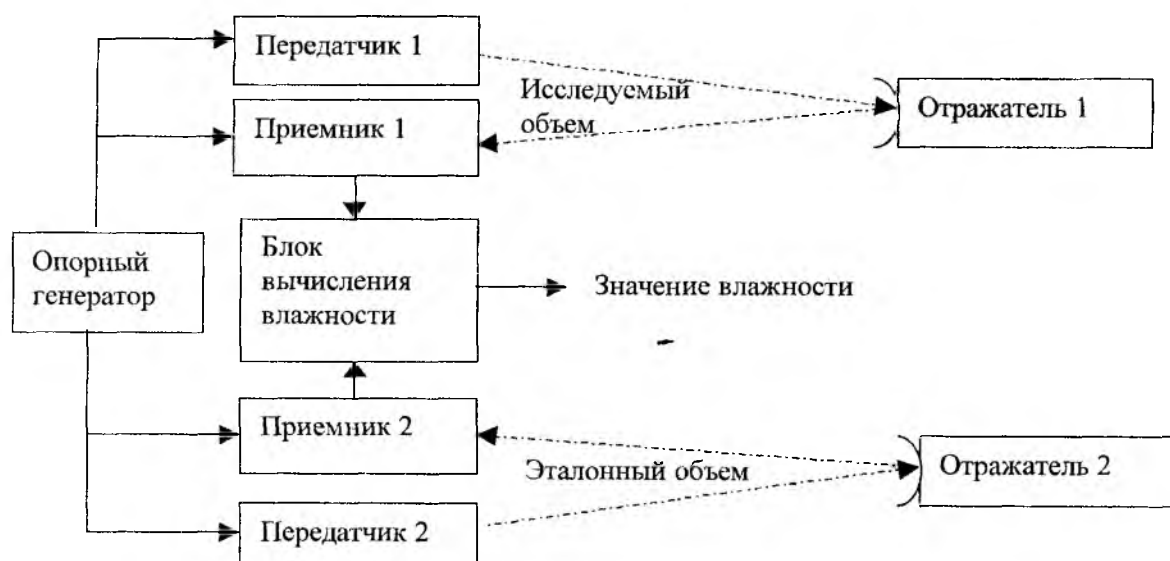


Рис. 1

Измеритель состоит из двух идентичных частей. Приемник 1, передатчик 1, отражатель 1 находятся в исследуемом объеме, влажность в котором необходимо определить, а передатчик 2, приемник 2, отражатель 2 – в эталонном объеме с сухим воздухом. В результате разности скоростей распространения звука в сухом и влажном воздухе образуется фазовый сдвиг между звуковыми колебаниями, принимаемыми приемниками 1 и 2. Эта разность фаз измеряется в блоке вычисления влажности, а по ней определяется влажность воздуха в исследуемом объеме.

Для контроля температуры и давления в измеритель также входят датчики температуры и давления. В рабочем варианте такого измерителя блок передатчика, приемника и отражателя, находящийся в эталонном объеме, может быть заменен вычислительным блоком, реализующем модель сухого воздуха при данных значениях температуры и давления атмосферы.

В практических приложениях имеет смысл рассмотреть два процесса: изобарный (случай свободной атмосферы и негерметизированного помещения) и изохорный (случай герметизированного объема). В качестве моделей, описывающих состояние атмосферы, будем рассматривать модель идеального газа, модель газа Ван-дер-Ваальса и уточненную инженерную модель идеального газа [2]. Целью исследования является обоснование перспективности применения предлагаемого бесконтактного высокоточного метода измерения влажности, а также оценка погрешности метода и влияния шумов на точностные характеристики измерителя.

1. Изобарный процесс.

При использовании модели идеального газа и модели газа Ван-дер-Ваальса выражения для скоростей звука в атмосфере имеют вид

$$c_{вл\ id..} = c_{сух} \cdot \sqrt{\left(1 + 0,28 \left(\frac{e}{p}\right)\right)} = \sqrt{\chi \frac{RT}{\mu}} \cdot \sqrt{\left(1 + 0,28 \left(\frac{e}{p}\right)\right)}, \quad (1)$$

$$c_{зв\ Ван-дер-Ваальса} = \sqrt{\left(\frac{V \cdot \mu_{см.}}{M_{см.}}\right)^2 \left(1 + \frac{R}{\mu \cdot C_{V\ см.}}\right) \frac{R \cdot T}{\left(\frac{\mu_{см.}}{M_{см.}} V - b_{см.}\right)^2} - \frac{2 \cdot a_{см.} \cdot M_{см.}}{V \cdot \mu_{см.}^2}} \quad (2)$$

где V – единичный объем; $M_{см.}$ – масса смеси воздуха и влаги, содержащейся в единице объема; e – парциальное давление водяного пара в смеси воздуха с паром; p – атмосферное давление; $\chi = C_p/C_v$ – отношение теплоемкостей в сухом воздухе; μ – молярная масса сухого воздуха; $\mu_{см.}$ – молярная масса смеси воздуха с паром; T – температура окружающей среды, °K; R – газовая постоянная; $a_{см.}$, $b_{см.}$ – постоянные Ван-дер-Ваальса для смеси воздуха с влагой; C_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме.

Методика расчета состоит в вычислении в единице объема массы пара и массы чистого воздуха по известным величинам их парциальных давлений путем решения общих уравнений

$$M_{пара} = e \cdot f(\mu_{пар}, T, C_v, \chi, a, b), \quad M_{воз} = (p_{атмосф} - e_{пара}) \cdot f(\mu_{воз}, T, C_v, \chi, a, b) \quad (3)$$

и вычисления массового коэффициента содержания пара в воздухе. В соответствии с вычисленным массовым коэффициентом определяются μ , C_v , a , b для смеси пара с воздухом и рассчитывается скорость звука во влажном воздухе. Далее определяется разность скоростей звука во влажном и сухом воздухе. Выражение для расчета разности фаз по вычисленной разности скоростей звука в сухом и влажном воздухе $\Delta C_{вл}$ имеет вид

$$\Delta \varphi^\circ = \omega \cdot L \cdot 180 \frac{\Delta C_{вл}}{\pi \cdot C_{сух} (C_{сух} + \Delta C_{вл})}. \quad (4)$$

2. Изохорный процесс.

Расчеты скорости звука и разности фаз производятся как и для изобарного процесса, однако в данном случае считаем, что в замкнутый объем 1 м^3 происходит выброс 1 г водяного пара и давление смеси пара с воздухом повышается пропорционально выбросу. Поэтому для нахождения массы чистого воздуха решается уравнение

$$M_{воз} = p_{атмосф} \cdot f(\mu_{воз}, T, C_v, \chi, a, b). \quad (5)$$

3. Оценка погрешностей.

Основными составляющими суммарной погрешности при измерении влажности являются: погрешность метода измерений и погрешность, обусловленная внутренними и внешними шумами измерителя.

3.1 Оценка погрешности метода измерения.

Основными источниками методической погрешности являются: ошибка измерения расстояния между передатчиком и отражателем, ошибки измерения температуры и давления. Следовательно,

погрешность данного метода измерений определяется из уравнения в частных производных от фазового набега звука в воздухе по расстоянию, температуре и давлению:

$$\delta\varphi = \sqrt{\left(\frac{\partial\Delta\varphi}{\partial L}\right)^2 \cdot (\Delta L)^2 + \left(\frac{\partial\Delta\varphi}{\partial T}\right)^2 \cdot (\Delta T)^2 + \left(\frac{\partial\Delta\varphi}{\partial p}\right)^2 \cdot (\Delta p)^2}. \quad (6)$$

При дальнейших расчетах ошибку измерения расстояния ΔL полагаем равной $5 \cdot 10^{-3}$ м, ошибку измерения температуры $\Delta T = 0,1^\circ\text{C}$, а ошибку измерения давления $\Delta p = 5$ мбар.

На основании приведенной методики были проведены расчеты чувствительности метода при работе акустического измерителя на частоте $f = 10$ кГц, при расстоянии между передатчиком и приемником 1 м, в диапазоне температур от 0 до 4°C . При изобарном процессе расчеты проводились для крайнего случая 100 % влажности в исследуемом объеме в целях определения максимально возможного набега фазы. При изохорном процессе определялся набег фазы при распространении звуковой волны в исследуемом объеме с абсолютной влажностью 1 г/м^3 .

Результаты вычисления зависимости набега фазы во влажном воздухе по сравнению с сухим и погрешности метода измерений для насыщенного пара при изохорном и изобарном процессах представлены в табл. 1 и проиллюстрированы графиками на рис. 2, 3.

Таблица 1

T, °C		0	10	20	30	40
Изобарный процесс						
Парциальное давление насыщенного пара, Е мбар		6,11	12,2	23,3	43,4	73,7
Набег фазы $\Delta\varphi$, °	модель идеального газа	9,2	17,8	33,5	61,5	102
	модель газа Ван-дер-Ваальса	9,5	18,4	35,2	63,3	109,2
Погрешность метода $\delta\varphi$, °	модель идеального газа	0,045	0,088	0,17	0,3	0,51
	модель газа Ван-дер-Ваальса	$2 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Изохорный процесс						
Набег фазы $\Delta\varphi$, °	модель идеального газа	5,03	5,05	5,05	4,98	4,82
	модель газа Ван-дер-Ваальса	6,08	6,16	6,18	6,13	6,01
Погрешность метода $\delta\varphi$, °	модель идеального газа	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
	модель газа Ван-дер-Ваальса	$8,07 \cdot 10^{-7}$	$8,03 \cdot 10^{-7}$	$8,12 \cdot 10^{-7}$	$7,58 \cdot 10^{-7}$	$8,23 \cdot 10^{-7}$

На рис. 2, а изображена зависимость набега фазы во влажном воздухе по сравнению с сухим в диапазоне температур от 0 до 40°C для насыщенного пара при изобарном процессе, а на рис. 2, б – при изохорном процессе. Кривая 1 соответствует модели идеального газа, а кривая 2 – модели газа Ван-дер-Ваальса.

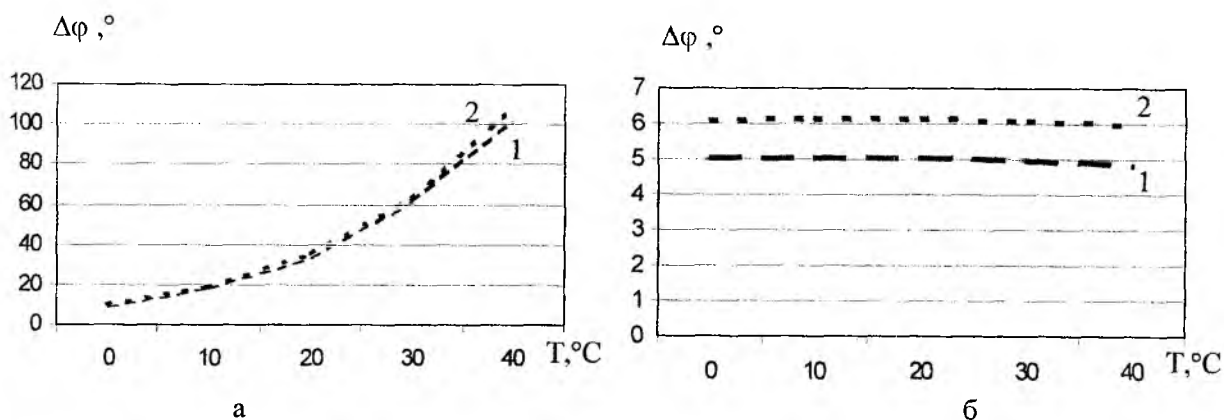


Рис. 2

На рис. 3.а представлена зависимость погрешности метода в диапазоне температур от 0 до 40°C для насыщенного пара при изобарном процессе, а на рис. 2, б – при изохорном процессе. Кривая 1, соответствует модели идеального газа, а кривая 2 – модели газа Ван-дер-Ваальса.

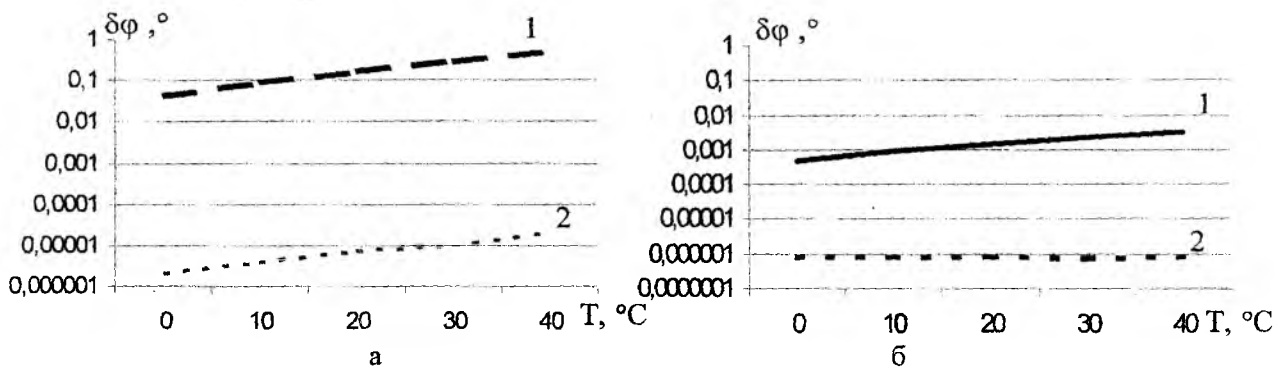


Рис. 3

Анализируя полученные зависимости, можно сделать вывод, что при изобарном процессе абсолютная среднеквадратическая погрешность измерений составляет 0,5% значения относительной влажности в диапазоне температур от 0 до 40°C. При изохорном процессе мы можем измерять концентрации выброса водяного пара порядка 1 мг/м³.

3.2 Оценка шумов АЦП.

При применении 16-разрядного АЦП на входах измерителя влажности мощность шумов АЦП определяется шумами квантования и нелинейностью характеристики

$$P_{ш} = P_{кв.} + P_{нел.} \frac{2^{-2b}}{3} (1 + 3(\delta_{LD} + 2\delta_L)), \quad (7)$$

где $P_{кв.}$ – мощность шумов квантования; $P_{нел.}$ – мощность шумов, обусловленная нелинейностью характеристики АЦП; b – количество разрядов АЦП; δ_{LD} – дифференциальная нелинейность; δ_L – интегральная нелинейность.

Среднеквадратическое отклонение (СКО) фазы из-за шумов АЦП равно

$$\delta\varphi_{кв} = \frac{180 \cdot \sigma_{ш.кв}}{\pi \cdot (1 + \operatorname{tg}^2(\varphi_0))}, \quad (8)$$

где $\sigma_{ш.кв.}$ – СКО шумов квантования, φ_0 – начальная фаза сигнала, и не превышает $2,5 \cdot 10^{-3}$ °. Следовательно, в оценке влажности инструментальной погрешностью можно пренебречь.

3.3 Влияние шумов.

При расчетах полагали, что шум является нормальным белым шумом. Результаты моделирования на ЭВМ влияния шумов, нестабильности частоты опорного генератора и времени усреднения результатов измерений на среднеквадратическое отклонение оценки разности фаз во влажном воздухе по сравнению с сухим представлены в табл. 2

Таблица 2

Сигнал/шум, дБ	СКО разности фаз, °				
	Время усреднения T, мс				
	0,25	2,5	25	250	1000
10	12	3,5	1,1	0,31	0,3
15	6	1,5	0,65	0,21	0,15
20	3,5	1,2	0,31	0,12	0,09

Результаты моделирования показали, что:

1. Предложенный метод обеспечивает высокую точность измерения влажности в диапазоне температур 0-40°C.

2. СКО уменьшается пропорционально \sqrt{N} , где N – количество измерений, что соответствует теории.

3. Так как время нестационарности атмосферных процессов гораздо больше 1 с, то в целях уменьшения среднеквадратической погрешности измерений, обусловленной шумами, время усреднения результатов измерений необходимо выбирать порядка 1 с.

4. Основной вклад в суммарную погрешность измерений при температурах от 0 до 20° С вносят шумы и нестабильность частоты, что обусловлено малым фазовым набегом в данном диапазоне температур при данных начальных условиях ($L = 1$ м, $f = 10$ кГц), а в диапазоне температур от 20 до 40°С основной вклад в суммарную погрешность измерений вносит погрешность метода.

5. Абсолютная среднеквадратическая погрешность измерений относительной влажности при изобарном процессе составляет от 1 % (соотношение сигнал/шум 20 дБ и время усреднения $T = 1$ с) при температуре 0°С до 0,5 % при 40 °С. Для уменьшения погрешности измерения до 0,5 % относительной влажности во всем диапазоне температур (определяется погрешностью метода) необходимо увеличивать набег фазы, увеличивая либо расстояние L между приемником и передатчиком, либо частоту звука, переходя к ультразвуковым частотам.

6. При изохорном процессе возможно определение концентрации выброса водяного пара на уровне 18 мг/м³ при данных начальных условиях, соотношении сигнал/шум 20 дБ, времени усреднения $T = 1$ с. Данная концентрация устанавливается влиянием шумов и набегом фазы в исследуемом объеме по сравнению с эталонным. Повысить точность измерений до 2 мг/м³ возможно, переходя на частоту ультразвука 100 кГц либо увеличивая расстояние между передатчиком и приемником до 10 м.

Полученные результаты относятся к предельно достижимым при оптимальных методах обработки и борьбы с шумами.

Список литературы: [1] Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферы. – Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1986. – 166 с. [2] Мордухович М.И. Акустический термометр // Труды ИФА АН СССР. – 1962. – №4. – С.30-80. [3] Матвеев Н.П. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – 640 с.

Харьковский Государственный Технический
Университет Радиотехники

Поступила в редколлегию 14.03.2000