

УДК 53.089.68: 543.271.2

**ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ И ПЕРЕДАЧА ЕДИНИЦ ВЛАЖНОСТИ:
ОТ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ОСНОВ ДО РАБОЧИХ ПРИБОРОВ**

*Каландаров П.И. – доктор технических наук, профессор
Национальный исследовательский университет «ТИИИМСХ»
Мамарасулов Х.К. – кандидат технических наук, и.о. доцента
Национальный исследовательский университет «ТИИИМСХ»
Валиев Р.А. – начальник отдела, самостоятельный соискатель
Узбекский национальный институт метрологии
Республика Узбекистан, Ташкент*

Аннотация: В статье исследуются теоретические и практические аспекты обеспечения единства измерений влажности газов. Рассмотрена термодинамическая модель воспроизведения единиц влажности на основе метода двух давлений, лежащего в основе первичных эталонов. Проанализированы механизмы передачи размера единицы от государственного эталона к рабочим средствам измерений через систему вторичных и рабочих эталонов. Представлена математическая модель расчета относительной влажности с учетом коэффициента сжимаемости реального газа. Приводятся сравнительные характеристики методов измерения и графические зависимости, обосновывающие выбор эталонного оборудования для нужд современной гигрометрии в Республике Узбекистан.

Ключевые слова: гигрометрия, первичный эталон, точка росы, прослеживаемость, генератор влажного газа, уравнение состояния, коэффициент сжимаемости.

**REPRODUCTION AND TRANSMISSION OF HUMIDITY UNITS:
FROM FUNDAMENTALS TO WORKING DEVICES**

**Kalandarov P.I. – Doctor of Technical Sciences, Professor
National Research University "TIIME"
Mamarasulov Kh. K. – Candidate of Technical Sciences, Acting Associate
Professor National Research University "TIIME"
Valiev R.A. – Head of Department, independent applicant
Uzbek National Institute of Metrology, Republic of Uzbekistan, Tashkent**

Abstract: The article examines the theoretical and practical aspects of ensuring the uniformity of measurements of gas humidity. A thermodynamic model for reproducing humidity units based on the two-pressure method underlying the primary standards is considered. The mechanisms of transferring the unit size from the state standard to working measuring instruments through a system of secondary and working standards are analyzed. A mathematical model for calculating relative humidity is presented, taking into account the compressibility coefficient of a real gas. Comparative characteristics of measurement methods and graphical

dependencies are presented, justifying the choice of reference equipment for the needs of modern hygrometry in the Republic of Uzbekistan.

Keywords: hygrometry, primary reference, dew point, traceability, wet gas generator, equation of state, compressibility coefficient.

ВВЕДЕНИЕ

Современная промышленность и фундаментальная наука предъявляют беспрецедентные требования к достоверности определения содержания водяного пара в газовых средах. Влажность, являясь одним из наиболее трудноизмеримых параметров физико-химического состояния вещества, требует многоступенчатой системы метрологического подтверждения. Проблема «разрыва» между фундаментальным определением единицы и показаниями рабочего датчика на объекте решается через создание строгой иерархической лестницы – от первичного эталона до прибора конечного потребителя [1].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Термодинамический метод воспроизведения (Метод двух давлений)

В основу исследования положен метод сорбционного насыщения газа при избыточном давлении с последующим адиабатическим расширением. Данный метод позволяет минимизировать влияние внешних флуктуаций температуры окружающей среды.

Алгоритм исследования процесса насыщения:

1. Газ-носитель (осушенный воздух или азот) подается в сатуратор (насыщатель), заполненный дистиллированной водой или льдом.
2. В сатураторе поддерживается постоянное давление P_s и температура T_s . При этом парциальное давление водяного пара e становится равным давлению насыщенного пара $e_s(T_s)$.
3. Для учета неидеальности газа вводится коэффициент усиления $f(P, T)$, расчет которого базируется на вириальном уравнении состояния.
4. После выхода из сатуратора газ дросселируется до давления в рабочей камере P_t . Относительная влажность рассчитывается по уточненной формуле, интегрирующей параметры обеих камер [5].

Математическая модель воспроизведения единицы

Фундаментом воспроизведения единицы влажности (например, в генераторах «двух давлений») является закон Дальтона и уравнение состояния реального газа. Относительная влажность U в рабочей камере прибора рассчитывается по следующей формуле:

$$U = \frac{f(P_s, T_s) \cdot e_s(T_s)}{P_s} \cdot \frac{P_t}{f(P_t, T_t) \cdot e_s(T_t)} \cdot 100\%$$

Где:

$e_s(T)$ — давление насыщенного пара над плоской поверхностью чистой воды (льда) при температуре T ; P_s, P_t — абсолютное давление в насытителе и рабочей камере соответственно; $f(P, T)$ — коэффициент усиления, учитывающий отклонение свойств влажного воздуха от модели идеального газа [2].

Именно учет коэффициента $f(P, T)$ определяет «научный вес» эталона, так как при высоких давлениях (свыше 1 МПа) погрешность пренебрежения этим фактором может достигать нескольких процентов, что недопустимо для эталонных систем.

Именно расчет неопределенности реализации шкалы точки росы [3] определяет «научный вес» эталона. В условиях Республики Узбекистан, характеризующихся значительными сезонными колебаниями атмосферного давления, учет коэффициента $f(P, T)$ становится критическим при калибровке рабочих приборов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Техническая реализация и иерархия передачи

Процесс передачи единицы (прослеживаемость) в метрологии влажности организован по принципу снижения точности от звена к звену.

Таблица 1

Иерархическая структура парка средств измерений влажности

Уровень	Тип оборудования	Метод измерения	Погрешность
Первичный эталон	Генератор влажного газа (2-Р/2-Т)	Термодинамический синтез	0,05 – 0,1%
Вторичный эталон	Прецизионный гигрометр	Охлаждаемое зеркало (Mirror)	0,1 – 0,3%
Рабочий эталон	Поверочная установка	Сорбционно-емкостной / Кулонометрический	0,5 – 1,5%
Рабочий прибор	Промышленный датчик	Резистивный / Емкостной	2,0 – 5,0%

Важнейшим аспектом при передаче единицы является температурная зависимость давления насыщенного пара.

Для понимания чувствительности эталона к температурным колебаниям необходимо проанализировать поведение давления насыщенного пара. Ниже представлена визуализация этой зависимости: на рисунке показано, как критически возрастает чувствительность системы к температурным флуктуациям.

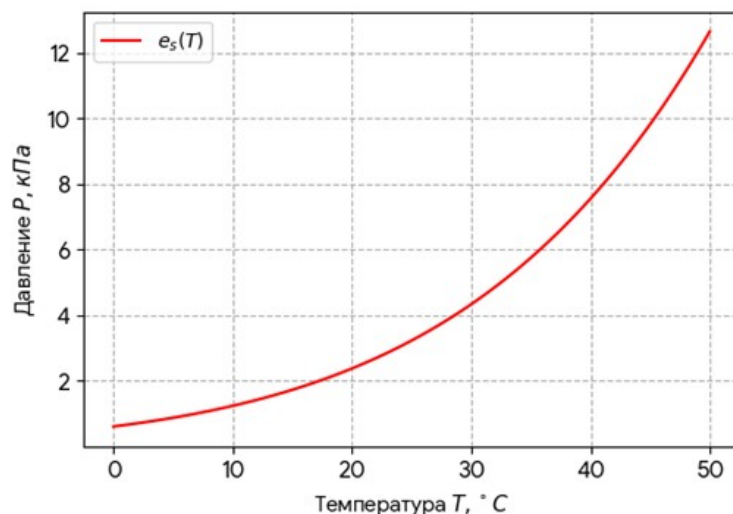


Рисунок 1. Графическая зависимость суммарной неопределенности от уровня влажности

Кривая демонстрирует экспоненциальный характер, что обуславливает необходимость термостатирования камер эталона с точностью до 0,005 °С для минимизации суммарной неопределенности» [4]. Кривая должна иметь U-образную форму, показывая рост погрешности в областях экстремальной сухости <5% и высокой влажности >95%).

Эффекты реального газа и фактор усиления в эталонных системах

В фундаментальной гигрометрии переход от модели идеального газа к реальному является ключевым этапом повышения точности. При воспроизведении единицы влажности методом «двух давлений» в насытителе создается избыточное давление, что ведет к отклонению поведения молекул воды от классических законов Дальтона [1]. Для компенсации этих отклонений в математическую модель вводится коэффициент усиления $f(P, T)$.

Математически зависимость фактора усиления от давления и температуры описывается следующим полиномом:

$$\ln f(P, T) = a \left(1 - \frac{e_w(T)}{P} \right) + \beta \left(\frac{P}{e_w(T)} - 1 \right)$$

где a и β — вириальные коэффициенты, зависящие от парциальных объемов компонентов смеси. Для условий Узбекистана, характеризующихся значительными сезонными колебаниями атмосферного давления и температуры, учет этого фактора становится критическим при калибровке рабочих приборов, эксплуатируемых в различных климатических зонах республики (от высокогорных районов до пустынь Кызылкума).

Эффекты реального газа и фактор усиления

При воспроизведении единицы влажности методом «двух давлений» в насытителе создается избыточное давление, что ведет к отклонению поведения молекул воды от классических законов. Исследования свойств материалов и газовых смесей при высоких давлениях [5, 8] подтверждают необходимость

динамической коррекции вириальных коэффициентов. Для повышения быстродействия эталонных систем в последние годы внедряются лазерные методы контроля, такие как TDLAS-гигрометрия [6], позволяющие проводить прямую валидацию содержания влаги в газовом потоке без фазовых переходов.

Алгоритм передачи единицы: от эталона к рабочему сенсору

Процесс передачи размера единицы влажности представляет собой последовательность операций, регламентированных национальными стандартами [9-10]. Основным методом является прямое сличение в термостабилизированной камере. Для подтверждения эквивалентности национальных шкал проводятся международные ключевые сличения в различных температурных диапазонах [7], что гарантирует глобальное единство измерений.

Анализ данной зависимости [1-8] показывает, что наиболее стабильная работа эталонного комплекса наблюдается в диапазоне 20–80% RH. В зонах экстремальных значений вступают в силу адсорбционные эффекты на стенках измерительных магистралей и эффект «замерзания» зеркала конденсационного гигрометра.

Техническая специфика и иерархия метрологической цепи

Для обеспечения единства измерений в масштабах страны разрабатывается иерархическая схема, связывающая первичный эталон с парком рабочих средств измерений (СИ).

Таблица 2

Сравнительный анализ методов передачи единицы влажности

Метод передачи	Тип вторичного эталона	Преимущества	Основной источник неопределенности
Прямое сличение	Конденсационный (Mirror)	Высокая стабильность	Температурный градиент в камере
Сличение по ПГС	Кулонометрический	Работа при низких влажностях	Расход электролита
Динамическое смещение	Сорбционно-емкостной	Высокая скорость поверки	Гистерезис сенсора

Практическая значимость для метрологической службы Узбекистана

Внедрение системы воспроизведения влажности на базе прецизионных генераторов позволит решить проблему прослеживаемости для метеорологических сетей Узгидромета. Учитывая запыленность и высокую инсоляцию, рабочие датчики часто подвержены дрейфу характеристик. Наличие национального эталона позволит проводить регулярную юстировку парка приборов без необходимости их вывоза за пределы республики, что существенно снижает эксплуатационные затраты и повышает достоверность данных экологического мониторинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие системы воспроизведения и передачи единиц влажности – от фундаментальных термодинамических основ до конечного рабочего прибора – является непрерывным процессом совершенствования измерительных технологий. Математические модели, учитывающие не идеальность газовых смесей, в сочетании с прецизионной аппаратной базой, формируют надежный фундамент для обеспечения качества продукции и безопасности окружающей среды. Внедрение рассмотренных методов в практику метрологических институтов Республики Узбекистан станет важным шагом к международному признанию результатов измерений и интеграции в глобальную метрологическую инфраструктуру.

Использованные источники:

1. Sonntag D. Important new values of the physical constants of 1986, vapour pressure formulations based on the ITS-90 and psychrometer formulae // *Zeitschrift für Meteorologie*. 1990. Vol. 40. P. 340-344.
2. Greenspan L. Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions // *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. 1977. DOI: 10.6028/jres.081a.011
3. Wiederhold P.R. *Water Vapor Measurement: Methods and Instrumentation*. CRC Press, 1997. DOI: 10.1201/9781420049442
4. Каландаров П.И. Валиев Р.А. Научно-технические основы создания Национального эталона влажности атмосферного воздуха в Республике Узбекистан. *Форум молодых ученых №3(115) 2026*.
5. Lovell-Smith J. W. et al. Uncertainty in the realization of the dew-point temperature scale // *Metrologia*. 2016. DOI: 10.1088/0026-1394/53/4/1046
6. Buchholz B. et al. Validation of a new TDLAS-based hygrometer // *Appl. Phys. B*. 2014. DOI: 10.1007/s00340-014-5775-4
7. Heinonen J. et al. Key Comparison CCT-K6: Dew-point temperature standards // *Metrologia*. 2018. DOI: 10.1088/0026-1394/55/1A/03001
8. Cezairliyan A. *Measurement of Properties of Materials*. McGraw-Hill, 1988.
9. ISO 6145-7:2009. Gas analysis — Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods.
10. РМГ 75-2014. ГСИ. Измерения влажности веществ. Термины и определения.