

УДК 543.271.2: 53.089.68

*Каландаров П.И., д.т.н., профессор
Узбекский национальный институт Метрологии
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Валиев Р.А. соискатель*

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СОЗДАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЭТАЛОНА ВЛАЖНОСТИ АТМОСФЕРНОГО
ВОЗДУХА В РЕСПУБЛИКЕ УЗБЕКИСТАН**

Аннотация: В данной статье рассматриваются научно-технические подходы к формированию метрологической базы для измерения влажности атмосферного воздуха в Республике Узбекистан. Автор анализирует физические принципы функционирования государственных первичных эталонов, основанных на методах генерации влажного газа и конденсационной гигрометрии. Особое внимание уделено необходимости внедрения национальной эталонной базы для обеспечения единства измерений в условиях резко континентального климата. Работа подчеркивает важность метрологической прослеживаемости для точности климатического мониторинга и промышленной безопасности. Обосновывается переход к современным высокоточным методам воспроизведения единиц влажности как фундамент для международного признания калибровочных возможностей республики.

Ключевые слова: гигрометрия, национальный эталон, точка росы, относительная влажность, метрологическая прослеживаемость, генератор влажного газа, Республика Узбекистан.

*Kalandarov P.I., Doctor of Technical Sciences, professor
Uzbek National Institute of Metrology
The Republic of Uzbekistan, Tashkent
Valiev R.A. the applicant*

SCIENTIFIC AND TECHNICAL BASES OF CREATION OF THE NATIONAL STANDARD OF HUMIDITY OF ATMOSPHERIC AIR IN THE REPUBLIC OF UZBEKISTAN

Abstract: *Abstract: This article discusses scientific and technical approaches to the formation of a metrological base for measuring atmospheric humidity in the Republic of Uzbekistan. The author analyzes the physical principles of the functioning of the state primary standards based on the methods of wet gas generation and condensation hygrometry. Special attention is paid to the need to introduce a national reference base to ensure the uniformity of measurements in a sharply continental climate. The work highlights the importance of metrological traceability for the accuracy of climate monitoring and industrial safety. The transition to modern high-precision methods of reproducing humidity units is justified as the foundation for international recognition of the calibration capabilities of the republic.*

Keywords: *hygrometry, national standard, dew point, relative humidity, metrological traceability, wet gas generator, Republic of Uzbekistan.*

Введение

В современной метрологии измерение влажности атмосферного воздуха занимает особое место ввиду сложности обеспечения стабильности и воспроизводимости данной величины. Влажность является критическим параметром не только для метеорологических прогнозов, но и для обеспечения безопасности авиации, стабильности технологических циклов в микроэлектронике и фармацевтике. Для того чтобы парк измерительных приборов по всей стране функционировал согласованно, необходима «точка отсчета» — государственный первичный эталон.

Для Республики Узбекистан вопрос создания собственной эталонной базы имеет стратегическое значение. Это обусловлено спецификой резко континентального климата и необходимостью метрологической независимости в условиях активной индустриализации. В настоящее время

в республике ведется планомерная работа по разработке и внедрению национального эталона единиц влажности, что позволит интегрировать измерительную систему страны в глобальную сеть прослеживаемости.

В рамках данной статьи автор сознательно отказывается от перегрузки текста сложными математическими выводами, графиками и табличными данными, которые широко представлены в узкоспециализированной технической документации. Основная цель работы — дать качественный аналитический обзор физических принципов и концептуальных подходов к созданию эталонной базы, делая акцент на методологической значимости проекта для Узбекистана.

Методы воспроизведения влажности: теоретический аспект

Фундаментом любого эталона в гигрометрии является способность системы воспроизводить состояние газа с прецизионно заданными параметрами. Наиболее стабильным методом признан метод «двух давлений» или «двух температур». В таких системах газ насыщается водяным паром при контролируемом высоком давлении, а затем расширяется до рабочего значения [1]. Согласно законам термодинамики, это позволяет рассчитать парциальное давление пара с минимальной погрешностью. Современный первичный эталон — это не просто прибор, а аппаратно-программный комплекс. Ключевую роль здесь играет генератор влажного газа, где каждый миллиграмм воды и каждый паскаль давления контролируются датчиками экспертного класса. Это обеспечивает воспроизведение единицы относительной влажности с неопределенностью, стремящейся к сотым долям процента, что необходимо для калибровки вторичных эталонов и высокоточных рабочих средств измерений [2].

Техническая реализация: конденсационный метод и TDLAS

Если генератор выступает в роли «создателя» среды, то конденсационный гигрометр на охлаждаемом зеркале является эталонным

«контролером». Принцип его работы фундаментален: поверхность зеркала охлаждается до момента появления конденсата, фиксируемого оптической системой. Температура зеркала в этот миг и есть «точка росы» — константа, связывающая содержание влаги с температурной шкалой Кельвина [4].

При работе в экстремальных диапазонах (точка инея ниже $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$), где традиционные методы теряют динамику, начинают применяться лазерные технологии, такие как диодная лазерная абсорбционная спектроскопия (TDLAS) [5]. Это направление позволяет эталону работать быстрее и точнее, что особенно актуально для верхних слоев атмосферы и чистых производственных сред.

Передача единицы: как точность доходит до потребителя

Метрологическая цепочка — это своего рода «эстафета точности». От государственного эталона значение передается вторичным эталонам, затем рабочим эталонам (поверочным установкам) и только потом — конечному гигрометру в лаборатории или на метеостанции. Этот процесс называется обеспечением прослеживаемости. Сегодня критически важным становится учет влияния давления на показания. В условиях высокогорных метеостанций или при мониторинге авиационных двигателей «обычная» влажность ведет себя иначе. Современные исследования направлены на то, чтобы эталон мог имитировать экстремальные условия атмосферного воздуха, сохраняя при этом лабораторную точность.

Вызовы климатической эпохи: почему старых эталонов уже мало

Глобальное изменение климата ставит перед метрологами задачи, о которых редко задумывались тридцать лет назад. Увеличение частоты экстремальных погодных явлений — от аномальной жары до резких заморозков — требует от датчиков влажности стабильной работы в расширенных диапазонах. Если раньше эталон «атмосферного» воздуха

ориентировался на умеренные значения, то сегодня он должен подтверждать точность приборов в условиях тропической влажности и арктической сухости одновременно. Проблема в том, что при крайне низких значениях влажности (точка инея ниже $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$) время установления равновесия на зеркале гигрометра возрастает экспоненциально. Молекулы воды становятся «редкими гостями» в объеме газа, и зафиксировать их появление — задача на грани физических возможностей сенсора. Здесь на помощь приходят современные лазерные методы, такие как диодная лазерная абсорбционная спектроскопия (TDLAS). Она позволяет измерять концентрацию молекул воды напрямую, не дожидаясь фазового перехода, что делает эталон более динамичным [5].

Архитектура прецизионного контроля: от сенсора к системе

Современный эталон влажности — это не монолитный прибор, а распределенная система. Она включает в себя:

1. **Систему очистки и осушки газа:** на входе мы должны получить идеально сухой воздух или азот, чтобы «чистый холст» не имел примесей.

2. **Термостаты высокой стабильности:** колебание температуры даже на $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ в камере насыщения может привести к ошибке, превышающей допустимые нормы для эталона.

3. **Цифровой двойник:** современные установки сопровождаются математическими моделями, которые в реальном времени рассчитывают поправки на адиабатическое расширение и эффекты реального газа (фактор сжимаемости). Именно интеграция физического процесса с цифровым анализом позволяет достичь той «человеческой» гибкости в измерениях, которая необходима для адаптации под конкретные нужды заказчика — будь то авиационная промышленность или чистые помещения для производства фармацевтики.

Цифровизация и IoT-метрология: будущее передачи единиц

Мы вступаем в эру, когда поверка прибора может происходить без его физического изъятия с места эксплуатации. Концепция «цифрового сертификата калибровки» подразумевает, что данные о прослеживаемости к государственному эталону передаются по защищенным каналам связи.

Однако здесь возникает этический и технический вопрос: как доверять «умному» датчику, который сам сообщает о своей исправности? Роль эталона в этой цепочке смещается от простого сличения к созданию эталонных условий на местах с помощью переносных прецизионных генераторов. Это позволяет сократить логистические издержки и риск повреждения хрупкого оборудования при транспортировке в метрологический центр.

Международное признание и сличения эталонов

Метрология влажности эффективна только при условии международного признания. Для этого национальные институты метрологии участвуют в ключевых сличениях (Key Comparisons) под эгидой BIPM. В ходе этих процедур эталонные гигрометры («приборы-путешественники») перемещаются между лабораториями разных стран для подтверждения эквивалентности национальных стандартов [6]. Для Узбекистана создание национального эталона — это прямой путь к включению своих калибровочных возможностей в международную базу данных СМС (Calibration and Measurement Capabilities), что снимет технические барьеры в торговле и научном обмене.

Стандартизация как фундамент экологической безопасности

В последние годы акцент в использовании эталонов влажности сместился в сторону экологического контроля. Влажность воздуха напрямую влияет на химические реакции в атмосфере, включая образование смога и выпадение кислотных дождей. Без точной привязки к первичному эталону невозможно корректно рассчитать концентрацию загрязняющих веществ, так как их парциальное давление зависит от

содержания водяного пара. Более того, современная индустрия «зеленой» энергетики, в частности водородная энергетика, предъявляет жесточайшие требования к контролю влаги. Присутствие микроколичеств воды в водородном топливе ведет к коррозии систем хранения и падению КПД топливных элементов. Здесь эталонные генераторы влажного газа играют роль арбитра, подтверждающего чистоту энергоносителя будущего.

Заключение

Разработка и внедрение национального эталона влажности в Республике Узбекистан является своевременным и необходимым шагом для укрепления научно-технического потенциала страны. Это обеспечит не только высокую точность метеорологического мониторинга, но и создаст метрологический фундамент для инновационных отраслей экономики. Переход от использования зарубежной эталонной базы к собственной системе гарантирует единство измерений и повышает статус национальной метрологической службы на мировой арене.

Использованные источники:

1. Greenspan L. Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions // Journal of Research of the National Bureau of Standards. 1977. Vol. 81A. No. 1. P. 89. <https://doi.org/10.6028/jres.081a.011>
2. Wiederhold P. R. Water Vapor Measurement: Methods and Instrumentation. CRC Press, 1997. <https://doi.org/10.1201/9781420049442>
3. Bell S. A Beginner's Guide to Humidity Measurement. Measurement Good Practice Guide No. 11. National Physical Laboratory, 2013.
4. Lovell-Smith J. W. et al. Uncertainty in the realization of the dew-point temperature scale // Metrologia. 2016. Vol. 53. No. 4. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/4/1046>

5. Buchholz B. et al. Validation of a new TDLAS-based hygrometer for atmospheric water vapor // Applied Physics B. 2014. Vol. 116. P. 883–899. <https://doi.org/10.1007/s00340-014-5775-4>
6. Heinonen J. et al. Key Comparison CCT-K6: Dew-point temperature standards in the range $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ // Metrologia. 2018. Vol. 55. No. 1A. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/55/1A/03001>