

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Винге Михаила Александровича

на тему: «Совершенствование системы обеспечения единства измерений параметров влажности и конденсации газов»,
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 - «Метрология и метрологическое обеспечение»

1. Актуальность исследований.

Диссертация М.А. Винге посвящена решению комплекса задач по обеспечению единства измерений и метрологической прослеживаемости результатов измерений температуры точки росы/иней (ТТР) газов в расширенном диапазоне значений от минус 79 °С до минус 120 °С при давлении рабочего газа до 30 МПа и температуры конденсации углеводородов (ТКУ) в природном газе с учетом влияющих факторов, а также измерений относительной влажности газов в расширенных диапазонах (от 0 % до 5 % и от 98 % до 100 %), учитывающих требования к метрологическим характеристикам соответствующих современных СИ.

Актуальность рассматриваемой диссертационной работы подтверждается тем фактом, что измерение параметров величин влажности различных газов приобретает все большее значение для обеспечения успешного функционирования ряда направлений практической деятельности общества. Так, многие технологические процессы требуют измерения влажности как воздуха, так и различных иных газов, например, при производстве изделий электронной техники необходимо строго контролировать уровень остаточной влажности в этих объектах, поскольку его превышение может привести к снижению срока службы и надежности выпускаемой продукции.

Рассматриваемая диссертационная работа актуальна ещё и потому, что в газовой отрасли наличие влаги и её количество существенно определяют

ОТЗЫВ НА ДИССЕРТАЦИОННУЮ РАБОТУ
В № 24475
«21» 11 20 25 г.
на 13 листах
приложение на 1 листах

качество природного газа и критически влияют на безопасность эксплуатации газопроводных систем.

Измерение относительной влажности воздуха востребовано при оценке качества жизни, при определении параметров микроклимата на рабочих местах, при хранении и транспортировании материальных и культурных ценностей, в музеях, библиотеках, архивах, складах.

На основе анализа диссертационной работы актуальность проведённых исследований для области экологии и контроля параметров загрязнения окружающей среды может быть сформулирована также следующим образом:

Проведённые автором исследования, позволившие расширить диапазон передачи единицы относительной влажности от ГЭТ 151, и разработанные эталонные генераторы температуры точки росы/иней и температуры конденсации углеводородов имеют высокую актуальность для контроля параметров окружающей среды.

Результаты диссертационной работы позволят в полном диапазоне обеспечить прослеживаемость к первичному эталону метрологических характеристик гигрометров, используемых в гидрометеорологии для наземных и бортовых измерений (включая радиозонды).

Обеспечение единства измерений влажности воздуха критически важно для моделирования климатических процессов, точного прогнозирования погоды и своевременного предупреждения о стихийных бедствиях (туманы, гололед, ливни).

Актуальным является создание низкотемпературного эталонного генератора, воспроизводящего ТТР в нижней части диапазона температур (до минус 120 °С), позволяющее обеспечить метрологическую прослеживаемость полученных средствами измерений результатов, используемых для контроля влажности верхних слоев атмосферы, где наблюдаются экстремально низкие значения влажности. Обеспечение точных измерений ТТР в нижней части диапазона температур необходимо для

проведения исследований в области физики атмосферы, в частности, для изучения процессов образования облаков и осадков.

Влажность является ключевым параметром, влияющим на распространение загрязняющих веществ в атмосфере, на процессы химических превращений (например, образование смога) и на корректность работы газоаналитического оборудования. Высокоточные измерения влажности способствуют повышению достоверности данных о концентрации вредных примесей.

Разработанные генераторы ТТР и ТКУ для высоких давлений анализируемой среды (до 30 МПа) позволяют моделировать и контролировать условия выбросов промышленных предприятий, в том числе при сжигании попутного нефтяного газа и работе технологического оборудования, где необходимо измерять точку росы по воде и углеводородам для оценки выбросов и соблюдения экологических нормативов.

Водяной пар является основным парниковым газом. Высокоточные измерения его содержания в атмосфере, обеспечиваемые поверенными с помощью новых эталонов приборами, важны для построения достоверных климатических моделей и оценки антропогенного воздействия на климат.

Таким образом, работа вносит прямой вклад в создание современной и точной системы мониторинга окружающей среды, создавая надёжную метрологическую основу для измерений влажности в самых разных, в том числе экстремальных, природных и антропогенных условиях.

Предлагаемые автором диссертационной работы решения по реализации метода воспроизведения величин при воспроизведении ТТР и ТКУ, разработанная им методика расширения диапазона передачи единицы относительной влажности от ГПЭ за счёт реализации комбинированного метода воспроизведения единицы даёт возможность решать актуальные вопросы обеспечения единства измерений единиц влажности газов и единицы температуры конденсации углеводородов.

2. Научная новизна и практическая значимость исследований

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

2.1. впервые разработана и научно обоснована моноблочная конструкция тепло-массообменного устройства комбинированного типа для эталонного генератора температуры точки росы. Это устройство, в котором объединены процессы сепарации и сатурации, позволяет минимизировать неопределенности воспроизведения ТТР, связанные с недоконденсацией или недонасыщением. Для экологического мониторинга это означает возможность впервые воспроизводить с эталонной точностью значения ТТР в сверхнизком диапазоне (до минус 120 °С), что критически важно для измерений в верхних слоях атмосферы, полярных регионах и в условиях экстремально сухого воздуха;

2.2. впервые предложен и исследован каскадный способ насыщения газа для работы при высоких давлениях. Этот способ, сочетающий высокоэффективное насыщение газа в первом каскаде с последующей стабилизацией температуры в многокамерном барботажном насытителе второго каскада, обеспечивает высокую эффективность насыщения с минимальной неопределенностью. Для контроля окружающей среды это создает принципиально новую возможность проводить точные измерения ТТР и температуры конденсации углеводородов (ТКУ) не только при атмосферном давлении, но и в условиях, моделирующих промышленные выбросы и технологические процессы, влияющие на экологическую ситуацию в регионе их размещения;

2.3. впервые предложен и реализован комбинированный алгоритм приготовления газовой смеси с одновременным использованием двух генераторов из состава ГЭТ 151, позволивший применить метод двух давлений и двух температур для воспроизведения относительной влажности. Это расширяет диапазон воспроизведения относительной влажности вплоть до граничных значений (0% и 100%), что имеет ключевое значение для метрологического обеспечения гигрометров, используемых в метеорологии

для прогноза туманов, осадков, а также для контроля условий испытаний материалов в климатических камерах

3. На основе выполненных М.А. Винге исследований им реализованы следующие практически значимые результаты:

3.1. разработаны воздушный низкотемпературный термостат и ТМОУ обладающие высокой теплопроводностью и теплоемкостью, отличающиеся минимизированными градиентами температуры, и позволяющие расширить диапазон воспроизведения единицы ТТР до минус 120 °С в Государственном первичном эталоне ГЭТ 151, что обеспечивает прослеживаемость к указанному ГЭ гигрометров сверхнизких концентраций влаги;

3.2. разработанные генераторы ТТР и ТКУ в области высокого давления рабочей среды (до 30 МПа) позволяют проводить поверку и калибровку анализаторов, используемых для контроля выбросов предприятиями й нефтегазовой и химической промышленности. Это позволяет точно определять содержание влаги и тяжелых углеводородов в выбросах, что необходимо для расчета валовых выбросов и соблюдения экологических нормативов;

3.3. обеспечена метрологическая прослеживаемость результатов измерений ТКУ, к Государственному первичному эталону ГЭТ 151, что позволяет российской промышленности наладить выпуск анализаторов ТКУ с более высокими точностными характеристиками;

3.4. реализация комбинированного метода позволила передавать единицу относительной влажности от Государственного первичного эталона (ГЭТ 151) рабочим эталонам и СИ в диапазоне от 0% до 100%. Это обеспечивает достаточную точность измерений относительной влажности в полном диапазоне значений, что важно для прогнозирования и регистрации периодов как экстремальной сухости (пожароопасность) так и 100% влажности (туманы), что также позволяет осуществлять прослеживаемость измеряемых величин к ГЭТ 151 при контроле параметров микроклимата

экологически значимых объектов (в хранилищах, лабораториях) в полном диапазоне значений этих параметров.

В целом, итогом научных исследований и практической реализации полученных результатов диссертационной работы М.А. Винге явилось усовершенствование Государственного первичного эталона ГЭТ 151 в части расширения функциональных возможностей по воспроизведению единиц относительной влажности газов, температуры точки росы/инея и температуры конденсации углеводородов и его аттестация в новом составе оборудования в качестве Государственного первичного эталона единиц относительной влажности газов, молярной (объемной) доли влаги, температуры точки росы/инея, температуры конденсации углеводородов ГЭТ 151-2020.

4. Положения, выносимые на защиту

4.1. Разработанная моноблочная конструкция тепло-массообменного устройства генератора влажного газа, отличающаяся объединёнными процессами сепарации и насыщения газа влагой позволяет воспроизводить температуру точки росы/инея в диапазоне от минус 120 °С до 0 °С с суммарной стандартной неопределённостью не более 0,06 °С.

4.2. Разработанная каскадная комбинированная конструкция тепло-массообменного устройства высокого давления с эффективностью насыщения более 99,95 % и минимизированными градиентами температуры (менее 0,03 °С) позволяет воспроизводить ТТР и ТКУ в диапазоне значений от минус 60 °С до плюс 30 °С при давлении газа от атмосферного до 30 МПа с суммарной стандартной неопределённостью не более 0,09 °С и 0,06 °С соответственно.

4.3. Реализация комбинированного метода воспроизведения относительной влажности за счет изменения алгоритма приготовления

газовой смеси в штатных эталонных генераторах ГПЭ позволяет расширить диапазон относительной влажности, в котором передаётся единица, до предельных значений с расширенной неопределённостью передачи не более 0,3 %.

5. Обоснованность и достоверность научных положений и выводов

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается результатами экспериментов, применением в исследовании достаточного математического аппарата, включая оценку неопределённостей.

6. Публикация основных результатов диссертационной работы

Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в 18 публикациях, из которых 4 статьи опубликованы в журналах, индексируемых в WoS и Scopus, 6 - в изданиях, рекомендуемых перечнем ВАК, получен один патент на полезную модель.

Основные положения выполненных исследований докладывались, обсуждались и были одобрены на 7 международных и всероссийских конференциях и семинарах, заседаниях рабочих групп по влажности ССТ ВРМ, заседаниях технического комитета ТК1.10 КОOMET.

7. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Разработанные генераторы позволяют воспроизводить условия, ранее недоступные для точного моделирования (сверхнизкие ТТР до минус 120 °С, высокие давления). Полученную аппаратуру целесообразно использовать для проведения высокоточных научных исследований и получения новых референтных данных. Это позволит провести такие исследования, как изучение процессов фазовых переходов воды при высоких давлениях и получить новые данные о физических свойствах влажных газов и углеводородных смесей для пополнения государственных стандартных справочных данных.

Полученные результаты в целом носят не только научный, но и выраженный прикладной, инфраструктурный характер. Их использование позволит повысить точность, достоверность и прослеживаемость измерений влажности во всех сферах, связанных с контролем параметров окружающей среды и технологических процессов, что в конечном итоге способствуют экологической безопасности, технологическому развитию и повышению качества научных данных в Российской Федерации.

8. Краткая характеристика основного содержания диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Содержание работы изложено на 125 страницах, включает 65 рисунков и 16 таблиц. Список литературы состоит из 82 наименований на 7 листах.

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели и задачи исследований, изложены научная новизна и практическая значимость диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведена общая характеристика работы, данные о ее апробации и реализации результатов.

В первой главе приведен обзор методов, лежащих в основе работы эталонов ТТР и ТКУ; рассмотрены задачи, при решении которых актуально измерение ТТР и ТКУ; определены востребованные диапазоны измерений величин и соответствующие им погрешности измерений, проведен анализ существующего парка СИ и эталонов ТТР и ТКУ, приведены данные о производителях СИ, представлены характеристики Государственного первичного эталона ГЭТ 151-2010.

На основе анализа существующих методов и эталонов воспроизведения ТТР и ТКУ выбран наиболее точный метод – метод фазового равновесия.

Во второй главе выполнен анализ технических и конструкторских решений, положенных в основу конструкции нового эталонного генератора ТТР, обеспечивающего работу в области сверхнизких значений температуры

точки росы/иней до минус 120 °С, приведена методика передачи единицы ТТР от ГПЭ подчиненным эталонным СИ в соответствии с ГПС.

Проведено сличения разработанного генератора с генераторами из состава ГЭТ 151 в общих для них диапазонах воспроизведения. Установлено, что отклонения характеристик разработанного генератора от генераторов из состава ГЭТ 151 не превышают значения погрешности примененного гигрометра-компаратора $\pm 0,05$ °С, что говорит о правильности принятых решений.

В третьей главе приведена конструкция эталонного комплекса генератора ТТР и ТКУ, реализующего метод фазового равновесия в диапазоне температур от минус 60 °С до плюс 30 °С и диапазоне давлений от атмосферного до 30 МПа. Приведён состав разработанного эталонного генератора ТТР и ТКУ высокого давления. Применяемые сепараторы позволяют выдерживать давление рабочего газа до 30 Мпа, что подтверждается проведенными расчётами на прочность конструктивных элементов генератора. Автором проведен расчет неопределенностей воспроизводимых единиц ТТР и ТКУ для разработанного эталонного генератора. Предельные расчетные значения суммарной стандартной неопределенности во всем диапазоне воспроизведения ТТР и ТКУ и во всем диапазоне рабочих давлений газа не превысили 0,06 °С и 0,09 °С соответственно. Автором также проведены сличения нового генератора с генераторами из состава ГЭТ 151, отличающимися принципом действия, в общих для них диапазонах давлений рабочего газа. Исследования показали, что расхождения ТТР, воспроизводимой генераторами, не превышают 0,05 °С.

В четвертой главе диссертационной работы автором представлен разработанный метод расширения диапазона ГЭТ 151 (без изменения конструкции эталонных генераторов), в котором воспроизводится и передаётся с оценённой неопределённостью единица относительной влажности газа. При воспроизведении значений относительной влажности

близких к 0 % и 100 %, автором применена комбинация методов двух давлений и двух температур, что позволило при сохранении всех достоинств метода двух давлений в основной части диапазона воспроизведения, расширить его границы до предельных за счет некоторого увеличения неопределенности воспроизведения. С целью практического опробования комбинированного метода автором были выполнены расчеты и разработаны процедуры передачи единиц величин влажности этим методом, что позволило расширить диапазон относительной влажности, в котором передаётся единица от ГПЭ, от 0 до 5 % и от 98 до 100 %. Суммарная неопределенность передачи единицы относительной влажности, при реализации комбинированного метода составила от 0,1 % до 0,3 %.

Результаты, полученные М.А. Винге в ходе диссертационной работы, позволили реализовать цепь метрологической прослеживаемости СИ температуры конденсации углеводородов к Государственному первичному эталону ГЭТ 151. Применяемый метод косвенных измерений позволил расширить диапазон значений величин, в котором передаются единицы от имеющихся эталонов поверяемым СИ. По результатам выполнения диссертационной работы разработана Государственная поверочная схема для средств измерений влажности газов и температуры конденсации углеводородов (ГПС), утвержденная приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15.12.2021 г. № 2885 и приказом от 21.11.2023 г. № 2415.

9. В заключении диссертационной работы М.А. Винге изложены основные результаты выполненной работы.

10. Личный вклад автора

Личный вклад Михаила Александровича Винге является определяющим и комплексным на всех этапах выполнения диссертационной работы, от постановки научных задач до их практической реализации и внедрения результатов и заключается в следующем:

- анализ публикаций по тематике решаемых задач, в том числе по конструкции и принципу действия существующих эталонов единиц ТТР и ТКУ;
- разработка состава, устройства, газовых и электрических схем низкотемпературного эталонного генератора ТТР и эталонных генераторов ТТР и ТКУ высокого давления;
- разработка технических решений, применённых в конструкции блоков генераторов, разработка алгоритма работы автоматизированной системы управления эталонными генераторами;
- разработка программного обеспечения эталонных генераторов и ГПЭ;
- теоретические расчеты неопределённости воспроизведения ТТР и ТКУ и экспериментальные исследования метрологических характеристик разработанных эталонных генераторов;
- разработка Государственной поверочной схемы для СИ влажности газов и ТКУ.

Личный вклад М. А. Винге является первостепенным и сквозным. Он проявился на всех стадиях исследования: от формулировки концепции, научного проектирования и создания уникального аппаратно-программного комплекса до проведения экспериментов, обработки данных, создания нормативной базы и непосредственного внедрения результатов в практику. Все защищаемые положения и результаты являются плодом его личной работы или работы, выполненной под его руководством

11. Замечания к содержанию диссертационной работы

В работе отсутствует сравнительный анализ неопределенностей воспроизведения разработанных генераторов с аналогичными зарубежными эталонными установками (NPL, PTB, NIST) в полном диапазоне измерений.

Автором не рассмотрены вопросы возможности использования предлагаемых методов воспроизведения при проектировании вторичных и рабочих эталонов.

Стоит отметить, что указанные недостатки не снижают полноту и значимость полученных автором научных и практических результатов.

12. Заключение

В целом, диссертация Винге М.А. является законченным исследованием и представляет решение актуальных задач в области совершенствования системы обеспечения единства измерений параметров влажности и конденсации газов. В работе использована основная литература по теме исследования, проанализирован большой объем вспомогательной информации. Материал работы изложен понятным языком, решаемая научная задача обоснована и актуальна, разработки и исследования обладают научной новизной, результаты исследований востребованы практикой. Диссертационную работу отличает сочетание теоретической и прикладной направленности. Выводы, рекомендации и вынесенные на защиту основные положения достаточно обоснованы. Диссертация изложена логично и последовательно.

Диссертационная работа, автореферат и опубликованные М.А. Винге работы достаточно полно отражают основное содержание диссертации и положительно характеризуют проведенные автором исследования.

Уровень решаемых задач соответствует требованиям, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Содержание диссертации соответствует специальности 2.2.10: «Метрология и метрологическое обеспечение».

Диссертационное исследование Винге Михаила Александровича на тему: «Совершенствование системы обеспечения единства измерений параметров влажности и конденсации газов» является завершенной научно-квалификационной работой, которая по критериям актуальности, научной новизны, обоснованности и достоверности выводов соответствует требованиям п. 7 «Положения о порядке присуждения учёных степеней». Диссертант, Винге Михаил Александрович, заслуживает присуждения ему

учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10:
«Метрология и метрологическое обеспечение».

Официальный оппонент:

Кандидат технических наук,

технический директор

ООО Научно – техническое предприятие «ТКА»

Барбар Юрий Алексеевич



подпись

дата 18 ноября 2025 г.

«Подпись Барбара Юрия Алексеевича удостоверяю»

должность Руководитель отдела кадров

дата « 18 »

ноября 2025 г.



Решетова Е.В.
подпись