



ВНИИМ

им. Д.И. Менделеева

Федеральное государственное унитарное
предприятие «Всероссийский научно-
исследовательский институт
метрологии им. Д.И. Менделеева»

Московский пр., д. 19, Санкт-Петербург, 190005
Тел.: (812) 251-76-01, факс: (812) 713-01-14
e-mail: info@vniim.ru | www.vniim.ru
ИНН 7809022120, КПП 783901001, ОКПО 02566450
ОГРН 1027810219007, ОКТМО 40305000000,
ОКОПФ 65241, ОКОГУ 1323565, ОКФС 12

21 НОЯ 2025

№ 241 - 21766

на № _____ от _____

Первому заместителю генерального директора -
Заместителю по научной работе
ФГУП «ВНИИФТРИ»
Щипунову А.Н.

п/о Менделеева. Солнечногорский р-н
Московская обл., 141570

Уважаемый Андрей Николаевич!

Направляем Вам отзыв официального оппонента, главного научного сотрудника лаборатории государственных эталонов и научных исследований в области теплового расширения и комплексного термического анализа ФГУП «ВНИИМ им.Д.И.Менделеева», доктора технических наук, Компан Татьяны Андреевны по диссертации Винге Михаила Александровича на тему «Совершенствование системы обеспечения единства измерений параметров влажности и конденсации газов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 «Метрология и метрологическое обеспечение»

Приложение: Отзыв официального оппонента на 8 л. В 1 экз.

Заместитель генерального директора

К.В. Чекирда

Исполнитель: гл.научн. сотр. Компан Т.А.
T.A.Kompan@vniim.ru, (812) 323-96-33

ФГУП «ВНИИФТРИ»
Вх. № 24577
«24» 11 20 25 г.
на 1 листах
ПОДЛОЖЕНС НА 8

ВНИИМ

им. Д.И. Менделеева

ОТЗЫВ

официального оппонента,

доктора технических наук, главного научного сотрудника ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева» Компан Татьяны Андреевны, на диссертационную работу Винге Михаила Александровича **«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»**.

Представленная диссертационная работа Винге Михаила Александровича посвящена вопросу совершенствования системы метрологического обеспечения измерений параметров влажности и конденсации газов.

Измерения параметров влажности и конденсации газов являются важным элементом многих современных технологических процессов. В частности, в микроэлектронике в процессе производства электронных компонентов контроль параметров влажности является необходимым элементом технологического процесса.

В газовой промышленности количество влаги и жидкой фазы углеводородов в газе влияет на безопасность его транспортировки и определяет потребительские качества природного газа. Необходимость контроля параметров влажности газов и температуры конденсации углеводородов явилась причиной увеличения парка соответствующих средств измерений, возрастания требований к их точности и диапазону измерений. Соответственно возросли требования к средствам метрологического обеспечения измерений параметров влажности и конденсации газов.

Особенно важной задачей стала необходимость обеспечения прослеживаемости результатов измерений к первичным эталонам.

В диссертации выполнен анализ состояния метрологического обеспечения измерений физических величин, используемых для описания влажности газов. Показана актуальность вопроса совершенствования системы метрологического обеспечения измерений параметров влажности и конденсации газов. Особенно остро этот вопрос стоит в области метрологического обеспечения измерений температуры конденсации углеводородов в диапазоне от минус 60 °С до плюс 30 °С при давлении рабочего газа от атмосферного до 30 Мпа, а также температуры точки росы/иней газов в диапазоне от минус 120 °С до минус 79 °С.

Актуальным является решение задачи расширения диапазона передачи единицы относительной влажности от ГПЭ рабочим средствам измерений в области измерения предельных значений (0 % и 100 %).

Заслуга диссертанта в том, что задача исследования сформулирована исходя из практической потребности совершенствования системы обеспечения единства измерений параметров влажности и конденсации газов.

Общая характеристика работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 82 библиографические ссылки. Общий объем работы составляет 125 страниц машинописного текста, включая 65 рисунков, 16 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ состояния измерений ТТР (температура точки росы) и ТКУ (температура конденсации углеводородов), рассмотрены существующие методы воспроизведения единиц ТТР и ТКУ, конструкция и принцип действия эталонов, приведены данные об отечественных и зарубежных производителях. Анализ методов воспроизведения ТТР и ТКУ показал, что наиболее точным методом является метод фазового равновесия, который был положен в основу разрабатываемого эталонного генератора ТТР в области низких значений ТТР и эталонного генератора ТТР и ТКУ при высоком давлении. Разработана математическая модель фазового равновесия, при котором процессы сорбции и десорбции влаги в газе приходят в равновесное состояние. Модель фазового равновесия смеси реальных влажных газов связывает основные характеристики термодинамической системы: температуру, давление и компонентный состав фаз. Для реализации фазового равновесия был выполнен расчет тепло-массообменных разрабатываемых генераторов.

Во второй главе описана предложенная конструкция разработанного генератора влажного газа, реализующего метод фазового равновесия при воспроизведении ТТР, обеспечивающая возможность расширения диапазона воспроизведения существующего ГПЭ в область сверхнизких значений температуры точки росы/иней до -120°C . Исследованы и обоснованы технические и конструкторские решения, положенные в основу конструкции эталонного генератора ТТР, его метрологические характеристики и методика передачи единицы ТТР. Автором впервые было предложено и экспериментально исследовано тепло-массообменное устройство (ТМОУ) комбинированного типа с последовательно расположенными сепаратором и сатуратором, объединенными в моноблок, что позволило снизить неопределенность воспроизведения ТТР в сверхнизком диапазоне воспроизведения и уменьшить составляющую неопределенности, свя-

занную с недонасыщением. Были исследованы метрологические характеристики эталонного генератора ТТР и проведены сличения разработанного генератора с генераторами из состава ГЭТ 151 в общих для них диапазонах воспроизведения. Результаты сличений показали, что отклонения характеристик разработанного генератора от генераторов из состава ГЭТ 151 не превышают значения погрешности примененного гигрометра-компаратора $\pm 0,05$ °С.

В третьей главе описана конструкция эталонного генератора ТТР и ТКУ, реализующего метод фазового равновесия в диапазоне температур от минус 60 до плюс 30 °С и диапазоне давлений от атмосферного до 30 МПа. Процессы в ТМОУ сепараторного и сатураторного типов аналогичны рассмотренным ранее во второй главе. Исследования генератора показали, что предложенная конструкция обеспечивает насыщенное состояние газа в генераторе при расходе газа до 5 л/мин, что достаточно для передачи единиц ТТР и ТКУ средствами измерений. Неопределенность по типу А воспроизведения ТТР и ТКУ не превысила 0,03 °С. 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.

В четвертой главе представлен разработанный автором метод расширения диапазона ГЭТ 151 (без изменения конструкции эталонных генераторов), в котором воспроизводится и передается с оцененной неопределенностью единица относительной влажности. Реализованный в ГЭТ 151 метод воспроизведения относительной влажности – метод двух давлений имеет ограниченный диапазон воспроизведения. Ограничение диапазона снизу вызвано значительным увеличением давления в системе генератора. Возможное применение метода двух температур также имеет ряд ограничений. Помимо увеличения неопределенности измерений за счет температурных составляющих, этот метод не реализует воспроизведение относительной влажности во всем необходимом диапазоне температур. Предложенная автором комбинация методов двух давлений и двух температур позволила, при сохранении всех достоинств метода двух давлений в основной части диапазона воспроизведения, расширить его границы до предельных за счет некоторого увеличения неопределенности воспроизведения. Для проверки правильности принятых технических решений проведено воспроизведение относительной влажности одними и теми же генераторами из состава ГЭТ 151 методом двух давлений и комбинированным методом при значениях, близких к границам общего диапазона воспроизведения этими методами. Расхождения значений относительной влажности, воспроизводимых различными методами, не превышают СКО применяемых гигрометров-компараторов, что подтверждает адекватность принятых решений. Результаты исследований показали, что применение комбинированного метода воспроизведения позволяет расширить диапазон относительной влажности, в ко-

тором ГПЭ передаёт единицу, не изменяя состав и конструкцию входящих в него генераторов. Результаты выполненной работы отражены в утверждённых методиках калибровки МК 06-04-2024 «Генераторы влажного газа и температуры конденсации углеводородов. Методика калибровки» и МК 06-05-2024 «Гигрометры и измерители температуры конденсации углеводородов. Методика калибровки». Результаты работы позволили расширить область аккредитации Восточно-Сибирского филиала ФГУП ВНИИФТРИ на выполнение поверки и испытаний СИ относительной влажности газов.

Созданные при выполнении работы средства и предложенные методы стали основой новой Государственной поверочной схемы для средств измерений влажности газов и температуры конденсации углеводородов (ГПС). Выполненные работы впервые обеспечили и позволили оформить в ГПС цепь метрологической прослеживаемости СИ температуры конденсации углеводородов и влажности газов к ГЭТ 151-2020 методом косвенных измерений при передаче единиц влажности путем их взаимного пересчета, что позволило сократить расходы поверочных лабораторий на приобретение и содержание эталонов каждой единицы величин влажности. Метод косвенных измерений позволил расширить диапазон значений величин, в котором передаются единицы от имеющихся эталонов поверяемым СИ.

Разработанная Государственная поверочная схема для средств измерений влажности газов и температуры конденсации углеводородов утверждена приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15.12.2021 г. № 2885 и приказом от 21.11.2023 г. № 2415.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы.

Положения, выносимые на защиту, соответствуют основным научным результатам, полученным в ходе выполнения диссертационной работы. Не вызывает сомнения научная и практическая значимость работы, личный вклад автора и представление работы в публикациях.

Наиболее существенные элементы научной новизны включают следующее:

- в диссертации выполнен подробный анализ актуального состояния метрологического обеспечения измерений параметров влажности и конденсации газов;
- обеспечена метрологическая прослеживаемость средств измерений температуры конденсации углеводородов к Государственному первичному эталону ГЭТ 151;
- расширен диапазон относительной влажности (до предельных значений 0 % и 100 %), в котором передаётся единица от Государственного первичного эталона со штатным комплектом оборудования, а также разработана методика калибровки гигрометров в полном диапазоне относительной влажности;

- предложен способ насыщения и реализована конструкция тепло-массообменного устройства, отличающаяся объединением процессов сепарации и сатурации влаги в едином устройстве, позволяющая снизить неопределённость воспроизведения температуры точки росы (ТТР) в диапазоне низких температур и давлений.

- предложен каскадный способ насыщения газа, отличающийся дроблением пузырьков газа через кристаллическое мелкодисперсное вещество в первом каскаде и многокамерной конструкцией сатуратора во втором, что позволило реализовать эффективное насыщение газа влагой при высоких давлениях и уменьшить составляющую неопределённости, связанную с недонасыщением;

- предложен алгоритм приготовления газовой смеси с использованием двух генераторов из состава ГПЭ, позволивший реализовать метод двух давлений и двух температур при воспроизведении относительной влажности и обеспечить с оценённой неопределённостью воспроизведение значений, близких к предельным границам диапазона относительной влажности.

Практическая значимость результатов диссертации для науки и практики состоит в следующем:

- создан Государственный первичный эталон, обеспечивающий возможность воспроизведения единицы относительной влажности газов, единицы молярной (объёмной) доли влаги, а также температуры точки росы/иней и температуры конденсации углеводородов;

- разработана Государственная поверочная схема для средств измерений влажности газов и температуры конденсации углеводородов;

- созданы эталонный генератор, воспроизводящий температуру точки росы в области низких значений этой физической величины, а также генератор температуры точки росы и температуры конденсации углеводородов для условий высоких давлений рабочего газа и в широком диапазоне температуры влажного газа.

- разработано тепло-массообменное устройство с воздушным термостатом, обеспечивающие возможность воспроизведения Государственным первичным эталоном ГЭТ 151 температуры точки росы в диапазоне до минус 120 °С;

- создан многокамерный сатуратор барботажного типа, обеспечивающий возможность воспроизведения температуры точки росы при давлении до 30 МПа;

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов обусловлена большим объемом экспериментальных исследований, а также корректным использованием математического аппарата и методик оценки погрешностей. Полученные результаты подтверждены также путем сравнения результатов воспроизведения ТТР разработанными генераторами с результатами воспроизведения ТТР Государственным первичным эталоном, который участвовал в международных ключевых сличениях ССТ-K6 и ССТ-K8,

организованных Международным бюро мер и весов, а также в двухсторонних международных сличениях стран-участниц организации KOOMET.

Публикация основных результатов диссертации. 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. Кроме того, по теме диссертации получен один патент на полезную модель.

Оценка содержания диссертации. Диссертация представляет собой законченное самостоятельное исследование по актуальной научной проблеме совершенствования системы обеспечения единства измерений параметров влажности и конденсации газов.

Оценивая работу в целом, считаю необходимым отметить логичность изложения материала, четкую аргументацию выводов. Диссертация написана хорошим языком, снабжена достаточным количеством иллюстраций. Структура работы отвечает задачам исследований.

Содержание автореферата достаточно полно отражает содержание диссертации и позволяет составить целостное представление о проделанной работе. Автореферат диссертации соответствует требованиям ГОСТ Р 7.0.11-2011.

Замечания по работе

Считаю необходимым сделать следующие замечания, касающиеся содержания работы:

1. При формулировании частных научных задач автор говорит о «расширении числа единиц величин». Какие новые величины и единицы величин были предложены? Или речь идет об одной величине - влажности? При формулировании Предмета исследований указаны «СИ величин влажности». Уточнить, о чем идет речь: о разных величинах или о разных единицах измерения влажности?
2. При формулировании «объекта исследования» указана «система обеспечения единства измерений единиц величин». Определение единицы величины является необходимым условием создания системы обеспечения единства измерений. Что понимается под обеспечением единства измерений единиц?
3. Формула (1.13) требует пояснения. Для выражения чего используется вириальное разложение, в чем проявились особенности описываемой задачи? Как далее это разложение использовалось в работе, в дальнейших вычислениях?
4. При оценивании неопределенности результата измерения первым шагом является запись модели измерения (уравнения измерений), которая используется для получения значения измеряемой величины. Это может быть иерархическая модель, где выходные величины для одной модели являются входными величинами для следующей модели. Также эти модели могут быть заданы как в явном, так и в неявном виде. Было бы це-

лесообразно указание модели измерений для формулы (3.2) расчета неопределенности.

5. Во второй главе указано, что влияние составляющей неопределенности воспроизведения ТТР, обусловленной нестабильностью влажности парогазовой смеси на входе в ТМОУ не выявлено. Однако результаты исследований, на которые ссылается автор (зависимость воспроизводимого значения ТТР от расхода парогазовой смеси через ТМОУ) это утверждение не подтверждают.

6. Во второй и третьей главах не рассмотрена составляющая неопределенности, связанная с отличием давлений между точками измерения и установки измерителя давления. В случае динамического процесса протекания газа в системе генератора эта составляющая может иметь ощутимый вклад.

7. Каким, конкретно, образом результаты исследований, полученные диссертантом, были подтверждены сличениями в общих диапазонах воспроизведения ТТР разработанных генераторов с ГПЭ, который принимал участие в международных ключевых сличениях ССТ-К6 и ССТ-К8

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования М.А. Винге.

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой по актуальной тематике.

Рекомендации по использованию результатов диссертационного исследования.

Результаты диссертационного исследования использованы при модернизации Государственного первичного эталона единицы относительной влажности газов, единицы молярной (объемной) доли влаги, а также температуры точки росы/иней и температуры конденсации углеводородов. Внедрение результатов диссертационных исследований позволили расширить температурный диапазон эталона до минус 120 °С.

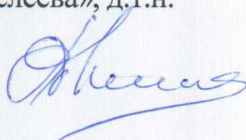
Результаты диссертационного исследования целесообразно использовать в региональных центрах стандартизации и метрологии Росстандарта для передачи единиц влажности от первичного эталона рабочим эталонам и прецизионным средствам измерений.

Диссертационная работа Винге Михаила Александровича, «Совершенствование системы обеспечения единства измерений параметров влажности и конденсации газов», является законченной научно-исследовательской квалификационной работой. В диссертации содержится решение задачи обеспечения метрологической прослеживаемости результатов измерений влажности газов и температуры конденсации углеводородов к Государственному первичному эталону, что имеет существенное значение для развития

гигрометрии в Российской Федерации. По критериям актуальности, научной новизны, обоснованности и достоверности выводов диссертация соответствует требованиям пункта 7 документа ВАК РФ «Положения о присуждении ученых степеней». Диссертант, Винге Михаил Александрович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.10 – «Метрология и метрологическое обеспечение».

Официальный оппонент
Главный научный сотрудник
ФГУП "ВНИИМ им. Д.И.Менделеева», д.т.н.

Подпись



Т.А. Компан

Дата 20.11.2025

Подпись главного научного сотрудника ФГУП «ВНИИМ», д.т.н.
Компан Татьяны Андреевны удостоверяю

Начальник отдела кадров ФГУП «ВНИИМ»



Копылова О.В.