Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Жумагали Асылбек Кайратулы

Аппаратно-программный комплекс воспроизведения влажности воздуха на основе насытителя малого объёма

Специальность 2.2.4 – «Приборы и методы измерения (по видам измерений)»

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Юрченко А. В.

г. Томск – 2026

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ....4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН И ВЫБОР ПУТЕЙ ЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ....12
1.1 Эталонные средства измерения в области измерения влажности....13
1.1.1 Гравиметрические гигрометры....13
1.1.2 Генераторы влажного газа....13
1.1.2.1 Генераторы влажного газа однонапорного типа....13
1.1.2.2 Генераторы влажного газа двухтемпературного типа....15
1.1.2.3 Генераторы влажного газа двухнапорного типа....16
1.1.2.4 Генераторы влажного газа гибридного типа....17
1.1.2.5 Генераторы влажного газа на основе метода смешивания потоков....19
1.1.3 Солевые растворы....21
1.2 Рабочие средства измерений в области измерения влажности....22
1.2.1 Конденсационный гигрометр точки росы....22
1.2.2 Емкостные гигрометры....23
1.2.3 Резистивные гигрометры....23
1.2.4 Электролитические гигрометры....24
1.2.5 Психрометрические гигрометры....25
1.3 Государственные эталоны влажности газов Республики Казахстан до проведения модернизации....26
1.4 Конструкции первичных генераторов точки росы, используемых в различных НМИ....28
1.5 Результаты международных сличений НМИ....39
1.6 Математическая модель температуры точки росы/инея....44
1.7 Преобразование единицы измерения температуры из значения сопротивления....45
Выводы по главе 1....46
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭТАЛОНА ТЕМПЕРАТУРЫ ТОЧКИ РОСЫ/ИНЕЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН....49
2.1 Актуальность создания эталона....49
2.2 Совершенствование государственного эталона единицы температуры точки росы/инея Республики Казахстан....49
2.2.1 Состав и описание эталонного комплекса....49
2.2.2 Исследование метрологических характеристик усовершенствованного эталонного комплекса....59
2.2.3 Компьютерное моделирование насытителя с теплообменником....66
2.2.4 Экспериментальные исследования усовершенствованного государственного эталона....68
2.3 Прослеживаемость единицы относительной влажности и объемной доли влаги от Государственного эталона единицы температуры точки росы/инея....76
2.4 Программная реализация применения коэффициентов чувствительности в составе аппаратно-программного комплекса первичного эталона....83
Выводы по главе 2....88
ГЛАВА 3. СЛИЧЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦЫ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОЧКИ РОСЫ/ИНЕЯ В ВНИИФТРИ И КАЗСТАНДАРТЕ....89
3.1 Организация сличения....89

3.2 Переносной эталон 90
3.3 Результаты сличения 92
3.4 Степень эквивалентности 94
3.5 Сопоставление результатов с контрольными значениями ключевых сличений CCT-K6 94
Выводы по главе 3 96
ГЛАВА 4. АКТУАЛИЗАЦИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОВЕРОЧНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВ 98
Выводы по главе 4 105
Заключение 106
Список сокращений и условных обозначений 108
Список литературы 109
Приложения А. Титульный лист методики исследований государственного эталона температуры точки росы/инея и объемной (молярной) доли влаги 119
Приложение Б. Акт об использовании результатов кандидатской диссертационной работы (РГП «КазСтандарт») 120
Приложение В. Протокол измерений АПК первичного эталона влажности воздуха 121

Введение

Актуальность темы исследования

Измерения влажности газов востребованы практически во всех отраслях современной экономики — от микроэлектроники и фармацевтической промышленности до нефтегазового сектора и метеорологии. Такие характеристики влажности, как температура точки росы/инея, относительная влажность и объёмная (молярная) доля влаги, оказывают существенное влияние на качество продукции, надёжность технологических процессов и безопасность инженерных систем. Особую значимость приобретает контроль термодинамических параметров газов в магистральных трубопроводах, где температура точки росы/инея отслеживается в диапазоне от минус 50 °C до 5 °C: недостоверность результатов подобных измерений способна спровоцировать образование гидратных пробок и привести к нештатным и аварийным ситуациям.

Базовой величиной, через которую в современной метрологии влажности воспроизводятся все остальные параметры влажного газа, является температура точки росы/инея. Относительная влажность и объёмная (молярная) доля влаги получаются из неё расчётным путём с использованием уравнения насыщенного водяного пара и коэффициентов чувствительности — частных производных соответствующих величин по температуре точки росы. Именно эти коэффициенты определяют, с какой точностью неопределённость измерения температуры точки росы передаётся в неопределённость относительной влажности и молярной доли влаги, и, как следствие, задают предельные метрологические характеристики первичного эталона.

Ключевым элементом первичного эталона температуры точки росы является насытитель — устройство, в котором газовый поток приводится в состояние термодинамического равновесия с водой (или льдом) при заданной температуре. Метрологические характеристики первичного эталона определяются прежде всего полнотой насыщения газа в насытителе и стабильностью его температуры. Использование насытителей малого объёма, размещаемых в компактных термостатируемых жидкостных ваннах, открывает возможности существенного повышения стабильности температурного поля и сокращения времени установления равновесия, однако требует научного обоснования режимов работы (расход газа, температура ванны, время выдержки), при которых достигается полное насыщение и температура точки росы потока на выходе совпадает с температурой жидкостной ванны.

Температура жидкостной ванны и температура потока на выходе из насытителя измеряются платиновыми термометрами сопротивления (ПТС) высшей точности по четырёхпроводной схеме включения с применением прецизионных мостов сопротивления (Fluke

1594A). Преобразование измеренного сопротивления в значение температуры выполняется по МТШ-90 с последующим пересчётом в значения влажности.

В последние годы погрешность рабочих эталонов аккредитованных лабораторий приблизилась к погрешности государственных эталонов, что вынуждало организации получать прослеживаемость единиц измерения от зарубежных национальных метрологических институтов (НМИ) и обусловило объективную необходимость модернизации отечественных эталонов.

Изложенное свидетельствует о том, что разработка аппаратно-программного комплекса для прецизионного воспроизведения единицы температуры точки росы/инея и относительной влажности на основе насытителя малого объёма, исследование закономерностей его работы, определение коэффициентов чувствительности для преобразования температуры точки росы в относительную влажность и молярную долю влаги, а также разработка проекта актуализированной государственной поверочной схемы представляют собой актуальную научно-техническую задачу. Содержание работы отвечает направлениям исследований п. 1, п. 2, п. 5 и п. 6 паспорта научной специальности 2.2.4 «Приборы и методы измерения (по видам измерений)»: созданию новых научно-технических решений, обеспечивающих повышение качества продукции в области измерений тепловых, электрических и аналитических (состава и свойств веществ) величин; совершенствованию метрологического обеспечения измерений; разработке и совершенствованию методов обеспечения единства измерений; разработке и внедрению новых эталонов единиц величин.

Теоретическую и научно-методологическую основу настоящего исследования составляют фундаментальные труды отечественных и зарубежных учёных — Н.И. Дубовикова, О.А. Подмурной, М. Хэйнонена, С. Белла, К.В. Мейера, Х. Сайранена, Д. Звиздика, Д. Сестана, Д. Худоклина, С. Хасегавы и ряда других исследователей, внёсших значительный вклад в развитие метрологии влажности и прецизионных измерений температуры.

Степень разработанности темы исследования

Вопросы построения первичных эталонов влажности газов и реализации насытите-лей различных конструкций рассматриваются в работах ведущих национальных метрологических институтов — NIST (США), NPL (Великобритания), PTB (Гер-мания), MIKES (Финляндия), NMIJ (Япония), ВНИИФТРИ (Российская Федерация). Известны генераторы влажности однонапорного (1-Р, 1-Т), двухтемпературного (2-Т), двухнапорного (2-Р) и гибридного типов, в которых насыщение газа происходит, как правило, в насытителях большого объёма, погружённых в массивные термостатируемые ванны. Электрические измерения температуры в таких эталонах реализованы по четырёхпроводной схеме с применением прецизионных мостов

сопротивления, обеспечивающих относительную неопределённость измерения сопротивления ПТС на уровне 10^{-6} и ниже.

Вместе с тем работа насытителей малого объёма исследована недостаточно: отсутствует общепринятая методика определения рабочих режимов, при которых температура точки росы потока на выходе из малого насытителя гарантированно совпадает с температурой жидкостной ванны в пределах суммарной стандартной неопределённости измерения температуры по электрическому сигналу ПТС, а значения коэффициентов чувствительности приводятся в известных работах фрагментарно и не сведены в форме, удобной для встроенной программной обработки. До настоящего времени исследованный насытитель малого объёма, электрические измерительные каналы на базе ПТС и прецизионных мостов сопротивления и программная часть, реализующая преобразование результатов электрических измерений в значения влажности и оценивание неопределённости, не объединялись в единый аппаратно-программный комплекс (АПК). Перечисленные обстоятельства определили выбор темы, постановку цели и формулировку задач настоящего диссертационного исследования.

Целью диссертационной работы является повышение точности воспроизведения единицы температуры точки росы/инея и единицы относительной влажности воздуха путём разработки аппаратно-программного комплекса, в основе которого лежат исследованный насытитель малого объёма, электрические измерительные каналы температуры на базе платиновых термометров сопротивления и прецизионных мостов сопротивления, а также программное определение коэффициентов чувствительности для преобразования температуры точки росы в относительную влажность и молярную долю влаги.

Объектом исследования является аппаратно-программный комплекс первичного эталона влажности воздуха, включающий насытитель малого объёма, термостатируемую жидкостную ванну и программное обеспечение преобразования результатов электрических измерений в значения температуры точки росы/инея, относительной влажности и молярной доли влаги.

Предметом исследования являются закономерности работы насытителя малого объёма при воспроизведении температуры точки росы/инея, коэффициенты чувствительности относительной влажности и молярной доли влаги к температуре точки росы, а также методы и алгоритмы преобразования результатов прецизионных электрических измерений сопротивления платиновых термометров в значения параметров влажного воздуха с оцениванием неопределённости.

Научные задачи исследования

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и последовательно решены следующие задачи:

– выполнить аналитический обзор существующих конструкций насытителей и методов воспроизведения и измерения температуры точки росы/инея и обосновать структуру аппаратно-программного комплекса первичного эталона;

– разработать конструкцию насытителя малого объёма, размещаемого в термостатируемой жидкостной ванне, и провести моделирование тепло- и массообменных процессов в нём для обоснования рабочих режимов;

– экспериментально исследовать работу насытителя малого объёма при воспроизведении температуры точки росы/инея в диапазоне от минус 50 °C до плюс 20 °C; установить условия (расход газа, температура жидкостной ванны, время выдержки), при которых температура точки росы газового потока на выходе из насытителя совпадает с температурой жидкостной ванны в пределах суммарной стандартной неопределённости;

– определить коэффициенты чувствительности относительной влажности и молярной доли влаги по температуре точки росы ($\partial RH/\partial Td$, $\partial x/\partial Td$) в рабочем диапазоне и реализовать их применение в программной части аппаратно-программного комплекса для преобразования температуры точки росы в производные параметры влажности;

– подтвердить измерительные возможности разработанного аппаратно-программного комплекса путём участия в международных ключевых сличениях и зарегистрировать измерительные и калибровочные возможности (СМС) в базе данных Международного бюро мер и весов (МБМВ).

Научная новизна работы заключается в следующем.

– Экспериментально установлены и научно обоснованы ранее не определённые рабочие режимы насытителя малого объёма (расход газа, температура жидкостной ванны, время установления термодинамического равновесия) в диапазоне температур точки росы/инея от минус 50 до плюс 20 °C, при которых температура точки росы газового потока на выходе из насытителя совпадает с температурой жидкостной ванны в пределах ±0,14 °C.

– Получены аналитические выражения и экспериментальные значения коэффициентов чувствительности $\partial RH/\partial Td$ и $\partial x/\partial Td$ для всего рабочего диапазона первичного эталона; реализован их пересчёт по фактическим текущим значениям входных величин в каждом измерительном цикле, что, в отличие от ранее применявшихся подходов с осреднёнными табличными константами, обеспечивает корректную оценку составляющих неопределённости при сильной нелинейности зависимости давления насыщенного водяного пара.

– Предложена и экспериментально обоснована архитектура аппаратно-программного комплекса (АПК) первичного эталона влажности воздуха, объединяющая насытитель малого объёма, четырёхпроводные электрические измерительные каналы сопротивления ПТС с прецизионными мостами и программные модули преобразования электрических величин в значения влажности с использованием коэффициентов чувствительности. Применение АПК в составе государственного первичного эталона температуры точки росы/инея обеспечивает снижение неопределённости воспроизведения единицы по составляющей типа А на порядок и по составляющей типа В на 42 % относительно характеристик эталона до модернизации.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы состоит в развитии методов исследования насытителей малого объёма как ключевого узла первичных эталонов влажности воздуха, в формализации применения коэффициентов чувствительности для перехода от температуры точки росы к относительной влажности и молярной доле влаги, а также в формулировании процедур оценивания неопределённости электрических измерений температуры по четырёхпроводной схеме при их использовании в составе аппаратно-программного комплекса первичного эталона.

Практическая значимость результатов работы выражается в следующем:

– усовершенствован государственный первичный эталон единицы температуры точки росы/инея: в его состав введены насытитель малого объёма и измерительные каналы температуры на базе платиновых термометров сопротивления и прецизионных мостов сопротивления;

– разработана и внедрена программная часть аппаратно-программного комплекса, реализующая преобразование результатов электрических измерений сопротивления ПТС в значения температуры точки росы, относительной влажности и молярной доли влаги с использованием коэффициентов чувствительности и формирующая протокол измерений с указанием неопределённости;

– подтверждено сохранение измерительных возможностей государственных эталонов в международных ключевых сличениях COOMET.T-K6.1 «Реализация локальных шкал температуры точки росы/инея влажного воздуха»;

– разработан проект актуализированной государственной поверочной схемы для средств измерений влажности газов, охватывающей в том числе единицу объёмной (молярной) доли влаги.

Результаты работы внедрены в РГП «КазСтандарт», что подтверждается соответствующим Актом о внедрении.

Методология и методы исследования

Методологической основой работы послужили положения теории измерений, теории неопределённости измерений, термодинамики влажного газа и теории тепло- и массообмена. Использованы прецизионное измерение электрического сопротивления платиновых термометров по четырёхпроводной схеме с применением мостов сопротивления; преобразование сопротивления в температуру по МТШ-90; расчёт коэффициентов чувствительности относительной влажности и молярной доли влаги по температуре точки росы на основе формула Харди; компьютерное моделирование тепло- и массообменных процессов в насытителе; экспериментальные методы исследования метрологических характеристик эталонных средств измерений; методы статистической обработки экспериментальных данных.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Метод воспроизведения единицы температуры точки росы/инея в диапазоне от минус 50 °С до плюс 20 °С, основанный на использовании насытителя малого объёма, размещённого в термостатируемой жидкостной ванне, обеспечивает экспериментально установленные режимы работы (расход газа, температура ванны, время выдержки), при которых температура точки росы газового потока на выходе из насытителя совпадает с температурой жидкостной ванны в пределах ±0,14 °С.

2. Аналитические выражения и экспериментально подтверждённые значения коэффициентов чувствительности $\partial RH/\partial Td$ и $\partial x/\partial Td$ в диапазоне температур точки росы от минус 50 °С до плюс 20 °С обеспечивают в каждом измерительном цикле программное преобразование результатов прецизионных электрических измерений сопротивления ПТС в значения относительной влажности и объёмной (молярной) доли влаги с одновременным пересчётом составляющих суммарной неопределённости и устанавливающие метрологическую прослеживаемость единиц относительной влажности и объёмной доли влаги непосредственно от Государственного эталона единицы температуры точки росы/инея.

3. Аппаратно-программный комплекс первичного эталона влажности воздуха РК, реализует четырёхпроводную схему измерения сопротивления платиновых термометров и автоматизированное преобразование значений сопротивления в значения влажности с использованием коэффициентов чувствительности, обеспечивая снижение неопределённости воспроизведения единицы температуры точки росы/инея по составляющей типа А в десять раз и по составляющей типа В на 42 % относительно метрологических характеристик ГЭТ KZ.01.01.00062-2017 до модернизации, что подтверждено результатами международных ключевых сличений COOMET.T-K6.1 (критерий $|En| < 1$ во всех температурных точках).

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается их подтверждением в рамках международных ключевых сличений COOMET.T-K6.1 «Реализация локальных шкал температуры точки росы/инея влажного воздуха», проведённых под эгидой Евро-Азиатского сотрудничества государственных метрологических учреждений (КООМЕТ); применением общепризнанных методов прецизионных электрических измерений сопротивления термометрических преобразователей, термодинамического анализа влажного газа и современных методов статистической обработки экспериментальных данных; наличием документально подтверждённой метрологической прослеживаемости всех использованных средств измерений к государственным и международным эталонам.

Основные результаты диссертационного исследования докладывались на следующих научных конференциях и форумах:

– V Международный форум «Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции» (г. Томск, 24–25 ноября 2022 г.);
– XXIV Международная научно-техническая конференция (г. Барнаул, 19 мая 2023 г.);
– VI Международный форум «Интеллектуальные системы 4-й промышленной революции» (г. Томск, 23–24 ноября 2023 г.);
– XX Международная научно-практическая конференция «Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики» (г. Тольятти, 18–19 апреля 2024 г.);
– Республиканский конкурс «Лучший молодой метролог 2025» (г. Астана, 30 апреля 2025 г.);
– XI Международный конкурс «Лучший молодой метролог КООМЕТ» (г. Ташкент, 11–13 ноября 2025 г.).

Публикации автора по теме диссертации

Результаты диссертационного исследования отражены в 11 научных публикациях, размещённых в рецензируемых научно-технических журналах и сборниках трудов конференций. В их числе: 3 публикации в изданиях, включённых в перечень рецензируемых научных изданий ВАК; 5 публикаций в материалах международных, всероссийских и региональных научных конференций; 2 публикации в журналах, индексируемых в международных базах научного цитирования Web of Science (WoS) и Scopus. Помимо этого, автором лично получен 1 патент на полезную модель.

Личный вклад автора

Все научные положения, выносимые на защиту, а также результаты, представленные в настоящей диссертационной работе, получены автором самостоятельно либо при его непосредственном участии. Автором лично сформулированы цели и задачи исследования,

разработана конструкция насытителя малого объёма, определены условия проведения экспериментальных исследований, обоснован состав измерительных каналов и схем их подключения, получены экспериментальные значения коэффициентов чувствительности, разработаны программные алгоритмы преобразования результатов электрических измерений в значения влажности и оценивания неопределённости. Вклад соискателя является определяющим во всех разделах диссертационной работы.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и общим объёмом более 3 страниц приложений. Полный объём диссертации составляет 121 страниц машинописного текста. Работа иллюстрирована 48 рисунками и содержит 26 таблиц.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН И ВЫБОР ПУТЕЙ ЕГО СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Влажность газов – показатель содержания воды в газах, описывающих в различных единицах измерений. К наиболее распространенным методам измерения влажности относят конденсационный, кулонометрический, психрометрический, диэлькометрический. В зависимости от применяемого метода измерения влажности определяют значения температуры точки росы/инея, относительная влажность, объемной (молярной) доли влаги.

Многообразие методов измерения влажности газов предопределило формирование разветвлённой номенклатуры соответствующих средств измерений. По состоянию на 07.12.2024 реестр государственной системы обеспечения единства измерений Республики Казахстан содержит сведения о более чем 200 утверждённых типах средств измерений влажности, для каждого из которых разработана и утверждена в установленном порядке методика поверки, регламентирующая требования к её организации и проведению.

Метрологическая прослеживаемость указанных средств измерений обеспечивается в соответствии с ГОСТ 8.547-2009 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений влажности газов» [1], устанавливающим иерархический порядок передачи размера единиц температуры точки росы/инея, относительной влажности, а также объёмной (молярной) доли влаги от государственных эталонов к рабочим средствам измерений.

Действующие национальные стандарты Республики Казахстан — СТ РК 2.114-2006 «Государственный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений относительной влажности газов» [2] и СТ РК 2.415-2016 «Государственный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений температуры точки росы/инея газов» [3] — разработаны с учётом актуальных метрологических возможностей государственных эталонов относительной влажности и температуры точки росы/инея, функционирующих на территории Республики Казахстан.

За минувшие два десятилетия был создан широкий круг эталонных средств измерений влажности газов, метрологические характеристики которых сопоставимы с характеристиками государственных эталонов РК или превосходят их. В результате действующие государственные эталоны РК оказались морально и технически устаревшими, что обусловливает необходимость их пересмотра и актуализации.

1.1 Эталонные средства измерения в области измерения влажности

1.1.1 Гравиметрические гигрометры

Гравиметрический гигрометр является первичным фундаментальным эталоном единицы влажности. В основе его работы лежит гравиметрический метод, при котором раздельно определяются масса водяного пара и масса сухого газа-носителя. Масса водяного пара находится прямым взвешиванием, а масса сухого газа — расчётным путём с использованием значений его плотности и объёма [4]. Массовое отношение влаги r вычисляется по формуле:

$$r = \frac{m_w}{m_g} \tag{1.1}$$

где m_w - масса воды в газе, m_g – масса сухого газа.

История применения гравиметрического метода измерения влажности насчитывает более ста лет [5, 6]. Вместе с тем сложность конструктивного исполнения и значительные массогабаритные характеристики ограничивают сферу его применения лабораториями национальных метрологических институтов, где данный прибор выполняет функцию государственного первичного эталона [7].

На практике реализация гравиметрического метода сопряжена с рядом факторов, порождающих дополнительные составляющие погрешности. Точность определения объёма сухого воздуха снижается из-за погрешностей при установке поршневого фиксатора и колебаний давления газа. Значимым источником погрешности служат также изменения условий окружающей среды в интервале между взвешиванием осушителя до и после поглощения влаги. Частичный унос сконденсированной воды из криогенной ловушки при откачке был оценён количественно в исследовании Sing [8]. Кроме того, нестабильность показаний возникает при замене поглотительных элементов после завершения цикла осушки и при несоблюдении регламентированных условий их хранения.

Для гравиметрических гигрометров установлены следующие значения расширенной неопределённости: до 0,16 % при массовом отношении влаги $r \geq 100$ мг/г; до 0,09 % при $r \geq 250$ мг/г; до 1,0 % при $r < 10$ мг/г [7].

1.1.2 Генераторы влажного газа

1.1.2.1 Генераторы влажного газа однонапорного типа

Генераторы влажного газа однонапорного типа (1-P) обеспечивают воспроизведение заданных параметров влажности в условиях неизменного давления по всей длине газового тракта. Принцип функционирования таких генераторов основывается на формировании насыщенного водяного пара при фиксированных термодинамических условиях: насыщение газа

происходит в сатураторе, погружённом в жидкостный термостат при температуре, отвечающей условиям фазового равновесия.

Значение температуры точки росы на выходе из насытителя определяется его рабочей температурой, которая задаётся жидкостным термостатом. В состоянии термодинамического равновесия температура точки росы газового потока совпадает с температурой термостатирующей ванны — именно это соответствие составляет физическую основу однонапорного метода воспроизведения влажности.

Процесс работы генератора начинается с подачи сухого газа, который возможно осуществить с помощью безмаслянного компрессора с ресивером или баллоном особого чистого азота. Подаваемый газ проходит через осушитель, попадая в насытитель. Для положительной температуры точки росы возможно использование дополнительного насытителя перед основной насытитель, который будет находиться в комнатные температуры. В насытителе влажный газ проходит над поверхности воды/льда обеспечивая полноценной насыщения газа.

Схема генератора влажного газа однонапорного типа представлена на рисунке 1.1.

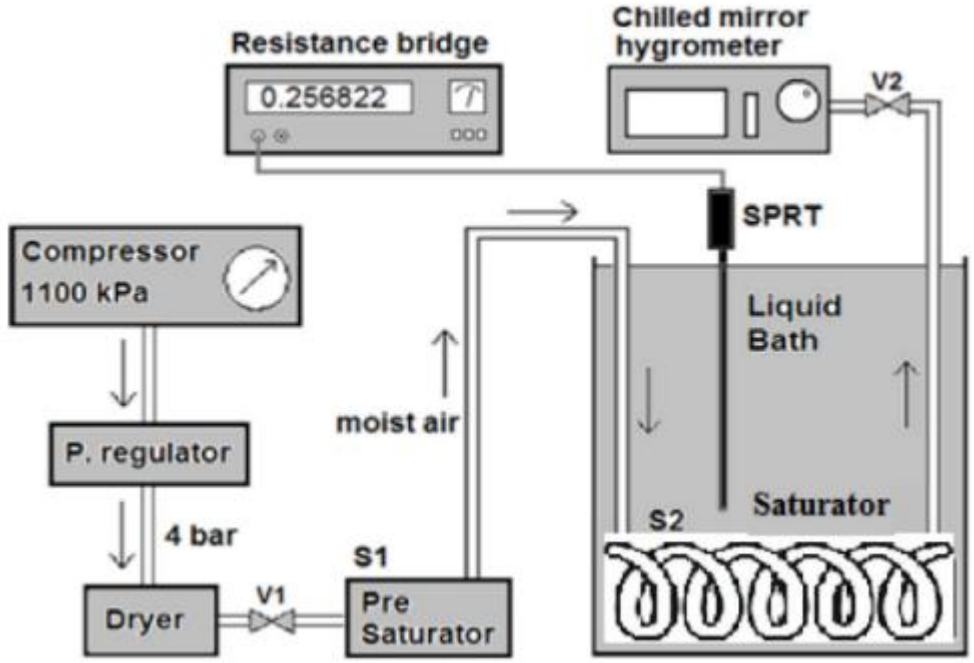


Рисунок 1.1 — Схематическая диаграмма генератора однонапорного типа [9]

Генератор однонапорного типа (1-P) может применяться в качестве первичного эталона для воспроизведения единицы температуры точки росы/инея. Идеализированная модель такого генератора предполагает выполнение следующих условий:

- наличие плоской поверхности химически чистой воды в насытителе;
- отсутствие теплообмена внутри насытителя и обеспечение стопроцентного насыщения газового потока водяным паром;

- отсутствие перепада давления по тракту генератора;
- отсутствие суммарного массопереноса молекул воды между пробой газа и стенками соединительной трубки (либо окружающей средой) на участке между насытителем и средством измерения температуры точки росы.

При соблюдении всех перечисленных допущений температура насытителя оказывается численно равной температуре точки росы/инея выходящего газового потока [10].

В рабочем диапазоне от минус 90 °С до плюс 20 °С расширенная неопределённость однонапорного генератора не выходит за пределы ±0,046 °С … ±0,116 °С [11–14].

1.1.2.2 Генераторы влажного газа двухтемпературного типа

Генераторы двухтемпературного типа (2-Т) функционируют при постоянном давлении газового потока — по аналогии с однонапорными генераторами (1-Р). Их отличительная особенность состоит в возможности воспроизведения параметров влажности одновременно в единицах температуры точки росы/инея и в единицах относительной влажности.

Метод работы двухтемпературного генератора предусматривает двухэтапную термическую обработку газа. На первом этапе газ насыщается водяным паром в насытителе при температуре, соответствующей заданному значению точки росы/инея. На втором этапе насыщенный газ поступает в термостатируемую рабочую камеру, где поддерживается более высокая температура, — в результате чего устанавливается требуемое значение относительной влажности. Регулирование уровня относительной влажности достигается независимым варьированием температуры насытителя и температуры рабочей камеры.

Данный метод воспроизведения влажности применяется как в одноходовых проточных схемах, так и в установках с замкнутым газовым контуром [15, 16].

Принципиальная схема генератора влажности двухтемпературного типа KW-2 представлена на рисунке 1.2.

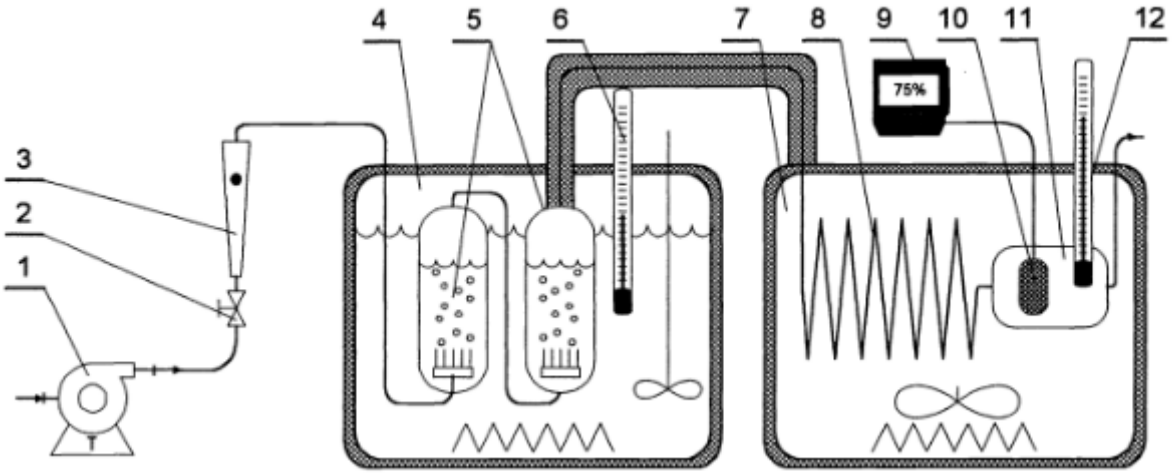


Рисунок 1.2 — Генератор влажности KW-2: 1 — воздушный компрессор; 2 — регулирующий клапан; 3 — ротаметр; 4 — водяной термостат; 5 — сатураторы; 6, 12 — термометры; 7 — воздушный термостат; 8 — нагревательный змеевик; 9 — интерфейс датчика; 10 — испытуемый датчик; 11 — испытательная камера [17]

Расширенная неопределённость генераторов влажного газа двухтемпературного типа составляет:

- от 0,01 % до 0,6 % в диапазоне относительной влажности от 2 % до 98 % при температуре от плюс 1 °С до плюс 80 °С [18];
- от 0,1 % до 1,2 % в диапазоне относительной влажности от 5 % до 95 % при температуре от минус 20 °С до плюс 60 °С [19, 20];
- от 0,25 % до 0,67 % в диапазоне относительной влажности от 13 % до 98 % при температуре от минус 7 °С до плюс 20 °С [21].

1.1.2.3 Генераторы влажного газа двухнапорного типа

Генератор двухнапорного типа (2-Р) реализует метод двух давлений. Корректная работа устройства требует подачи газа высокого давления, удовлетворяющего нормативным требованиям по чистоте, степени осушения и отсутствию масляных загрязнений.

Сжатый воздух подаётся в насытитель, размещённый в термостатируемой ванне с регулируемой температурой. На выходе из насытителя фиксируются значения температуры и давления (Ts, Ps). Насыщенный воздух высокого давления затем подвергается изотермическому расширению посредством регулирующего клапана до давления, близкого к атмосферному, после чего поступает в испытательную камеру. В испытательной камере проводится повторное измерение температуры и давления (Tc, Pc). Для непрерывного мониторинга данных параметров генератор укомплектован манометрами и температурными датчиками. [22–24].

Общий вид генератора влажного газа двухнапорного типа представлен на рисунке 1.3.

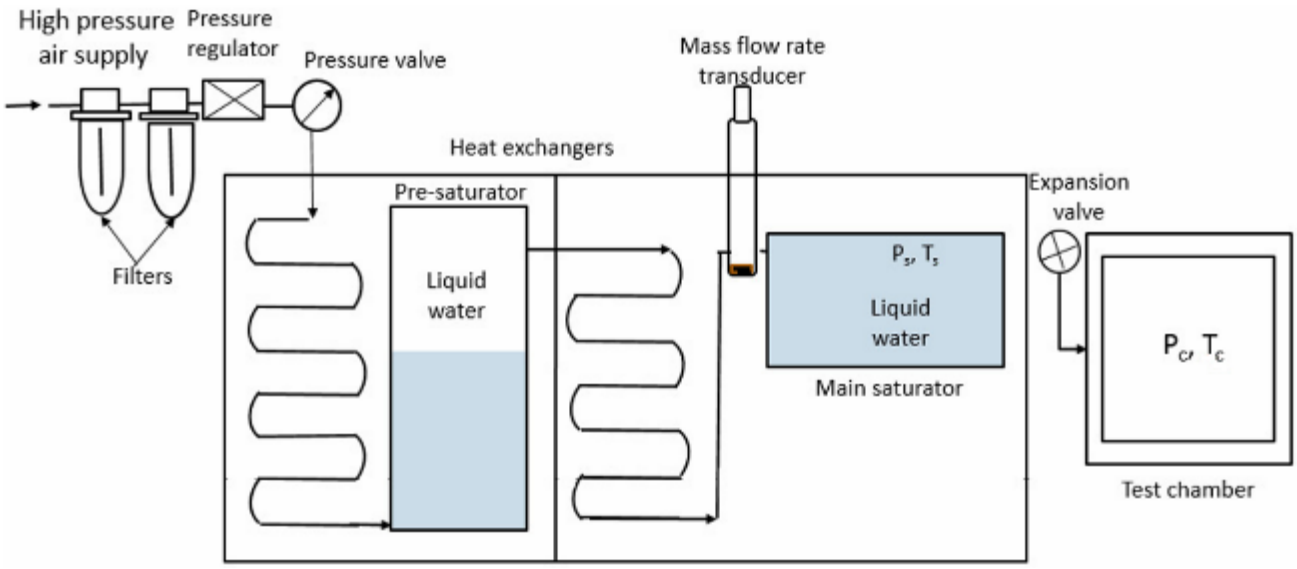


Рисунок 1.3 — Генератор влажного газа [25]

При проектировании и изготовлении генераторов двухнапорного типа к числу приоритетных инженерно-технических задач относятся: исключение явления конденсатообразования в расширительном элементе конструкции, а также обеспечение устойчивости газового потока независимо от величины соотношения рабочих давлений.

Воспроизводимое значение относительной влажности является функцией исключительно давлений насыщения *P*s и давления в испытательной камере *P*c и не обнаруживает существенной зависимости от температуры окружающей среды. Необходимым и достаточным условием корректного функционирования генератора выступает равенство температуры насытителя *T*s температуре испытательной камеры *T*c, отклонение от которого влечёт за собой нарушение метрологических характеристик прибора.

Расширенная неопределённость генераторов влажного газа двухнапорного типа составляет:

- от 1,1 % до 1,8 % в диапазоне относительной влажности от 10 % до 98 % при температуре плюс 25 °C [26];
- от 0,17 °C до 0,27 °C в диапазоне температуры точки росы от минус 20 °C до плюс 60 °C [27];
- от 0,178 % до 0,419 % в диапазоне относительной влажности от 10 % до 98 % при температуре от минус 10 °C до плюс 70 °C [28];
- от 0,1 °C до 0,25 °C в диапазоне температуры точки росы от 0 °C до плюс 20 °C [29].

1.1.2.4 Генераторы влажного газа гибридного типа

Генератор влажного газа гибридного типа представляет собой комбинированное устройство, объединяющее в единой конструкции принципы двух методов воспроизведения влажности: метода двух давлений и метода разделённого потока.

Метод двух давлений базируется на принципе насыщения газа водяным паром при повышенном давлении с последующим изотермическим расширением газового потока до номинального рабочего давления. Метод разделённого потока предполагает смешение насыщенного газа с осушенным газом-носителем при условии прецизионного дозирования объёмных расходов каждого из компонентов смеси. Применение указанного метода обеспечивает воспроизведение произвольно малых значений влажности при функционировании насытителя в технически удобном диапазоне рабочих температур, что определяет его практическую значимость при решении задач высокоточной влагометрии [30].

Конструкция насытителя генератора влажного газа гибридного типа показана на рисунке 1.4.

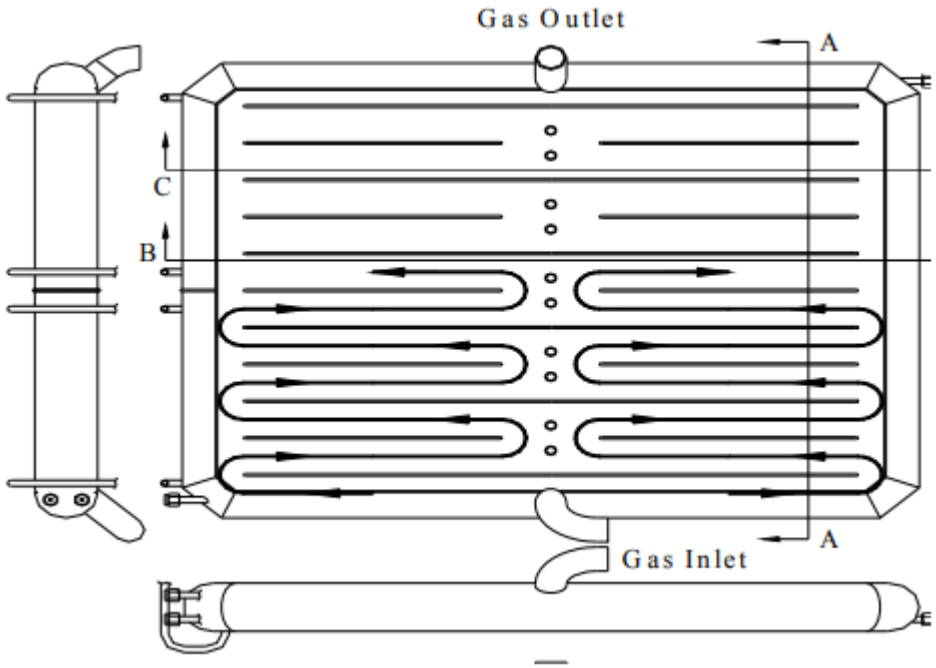


Рисунок 1.4 — Насытитель генератора влажного газа гибридного типа [31]

В основу функционирования генератора положен метод двух давлений. Подача газа от источника с рабочим давлением 550 кПа обеспечивает поддержание заданного избыточного давления в камере насыщения при установленном расходе 30 л/мин. Управление давлением газового потока на выходе из насытителя возложено на расширительный клапан, исполнительным органом которого служит дроссельная заслонка, кинематически связанная с высокоскоростным электродвигателем через понижающий редуктор. Автоматическое поддержание заданного положения заслонки реализуется ПИД-регулятором, формирующим управляющее воздействие по сигналу тензометрического датчика давления. Конструктивно расширительный клапан установлен непосредственно над термостатируемой ванной и гидравлически сопряжён с газовым выходом камеры насыщения.

В дополнение к методу двух давлений рассматриваемый генератор располагает возможностью формирования влажного газа методом разделённого потока, реализованным на базе газового мультиплексора. Последний включает в себя семь автономных измерительных блоков расхода, каждый из которых образован серийным регулятором массового расхода и серийным расходомером, построенным на основе элемента с ламинарным течением и предназначенным для измерения стандартного объёмного расхода [32].

Метрологические характеристики генератора влажного газа гибридного типа определяются следующими значениями расширенной неопределённости. В единицах молярной доли влаги данная величина составляет от 2,5 мкмоль/моль до 0,57 моль/моль в диапазоне температуры точки росы/инея от минус 70 °С до плюс 85 °С. При сужении диапазона до температур точки росы/инея от минус 60 °С до плюс 85 °С расширенная неопределённость не превышает 0,025 К. В области температур точки инея от минус 70 °С до минус 60 °С указанная характеристика возрастает до значений в диапазоне от 0,025 К до 0,060 К [33].

1.1.2.5 Генераторы влажного газа на основе метода смешивания потоков

Принцип действия генераторов данного типа основан на смешении увлажнённого газа с осушенным газом-носителем в регламентированном соотношении, при этом результирующая концентрация влаги в формируемой газовой смеси определяется долевым вкладом каждого из смешиваемых компонентов. Первичная реализация данного метода предъявляет требование прецизионного знания исходного влагосодержания как увлажнённого, так и осушенного газа до начала процесса смешения.

Фактически воспроизводимые значения влажности результирующей смеси, равно как и составляющие суммарной погрешности её определения, обусловлены совокупностью следующих факторов: исходным влагосодержанием подаваемых компонентов, погрешностью его определения, а также точностью измерения объёмного расхода каждого из них в процессе смешения [34].

Схема реализации метода смешивания потоков газа в генераторе влажности приведена на рисунке 1.5.

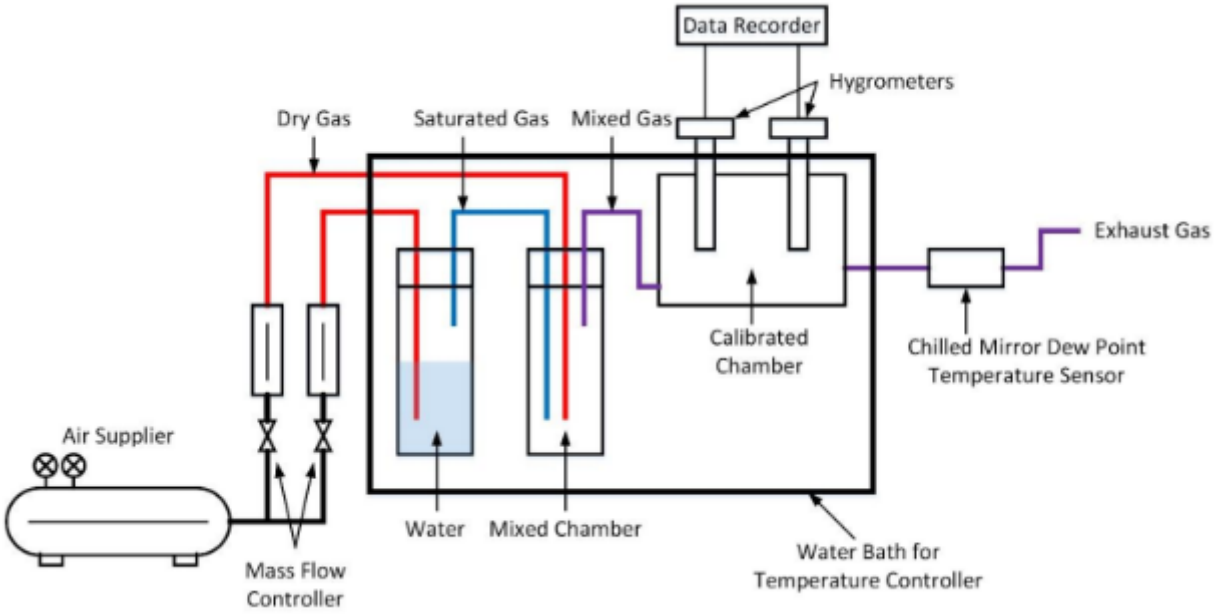


Рисунок 1.5 — Схема реализации метода смешивания потоков газа в генераторе влажности [35]

Среди достоинств генераторов влажного газа, функционирующих на основе метода смешивания потоков, следует выделить способность обеспечивать высокие скорости газового потока, а также возможность оперативного выхода на заданный уровень влажности. Вместе с тем данный класс генераторов характеризуется рядом существенных ограничений: достигаемые результаты воспроизведения влажности находятся в прямой зависимости от глубины осушения подаваемого газа, а также от точности измерения и стабильности регулирования его объёмного расхода.

Расширенная неопределённость генераторов влажного газа, реализующих метод смешивания потоков, характеризуется следующими значениями:

— от 0,2 °C до 0,5 °C в единицах температуры точки росы в диапазоне относительной влажности от 15 % до 75 % при температуре окружающей среды от плюс 5 °C до плюс 45 °C [36];

— 1 % в диапазоне относительной влажности от 10 % до 90 % при температуре плюс 20 °C [37];

— не более 0,7 % в единицах относительной влажности при номинальном значении 60 % в диапазоне рабочих температур от плюс 15 °C до плюс 35 °C [38];

— от 0,82 % до 1,45 % для резистивного датчика влажности и от 0,63 % до 1,4 % для ёмкостного датчика влажности в диапазоне относительной влажности от 20 % до 95 % при температуре от плюс 20 °C до плюс 25 °C [35].

1.1.3 Солевые растворы

Насыщенные солевые растворы относятся к классу калибраторов с фиксированной точкой, действие которых основано на химическом равновесии в замкнутой системе. Такие системы стабильно поддерживают определённое значение относительной влажности внутри герметичной ёмкости ограниченного объёма. Рабочий раствор находится в фазовом равновесии с собственной паровой фазой в присутствии воздуха при атмосферном давлении. После установления равновесного состояния уровень относительной влажности в ёмкости определяется природой конкретного раствора и зависит от температуры окружающей среды. Полученное значение характеризуется высокой воспроизводимостью и может служить реперной точкой при калибровке гигрометров [39–43].

Порядок применения насыщенных солевых растворов и практические рекомендации по работе с ними определены стандартом ASTM E104-85 [44].

Общий вид калибратора влажности на насыщенных солевых растворах показан на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 — Общий вид калибратора влажности на насыщенных солевых растворах

Существенным ограничением использования насыщенных солевых растворов в качестве калибровочных средств является длительный период установления термодинамического равновесия, достигающий приблизительно 12 часов.

Расширенная неопределённость калибровки датчиков влажности с применением насыщенных солевых растворов составляет:

- от 1,2 % до 1,9 % для датчиков резистивного типа и от 0,6 % до 1,3 % для датчиков ёмкостного типа [45];
- от 1,2 % до 2,0 % в единицах относительной влажности при температуре плюс 25 °C [46].

1.2 Рабочие средства измерений в области измерения влажности

1.2.1 Конденсационный гигрометр точки росы

Конденсационные гигрометры точки росы занимают лидирующее положение среди прецизионных средств измерений влажности и широко применяются как в научных атмосферных исследованиях, так и в промышленных условиях.

Измерение температуры точки росы в конденсационных гигрометрах основано на регулировании температуры зеркала до такого значения, при котором на его поверхности устанавливается динамическое равновесие между процессами конденсации и испарения влаги. Охлаждение зеркала осуществляется посредством термоэлектрического элемента, управляемого в автоматическом режиме на основании сигнала, поступающего от датчика конденсата.

Метрологические характеристики данного метода определяются двумя взаимосвязанными факторами: степенью точности измерения температуры зеркальной поверхности и качеством её стабилизации на уровне температуры точки росы. Выполнение первого из указанных условий достигается, как правило, посредством платинового термометра сопротивления, конструктивно интегрированного в корпус зеркала в непосредственной близости от зоны конденсации. При этом необходимо принимать во внимание, что значительная теплоёмкость зеркального элемента вызывает временно́е запаздывание процесса теплопередачи через его тело, что оказывает влияние на динамические характеристики прибора и подлежит учёту при их оценке.

Обеспечение штатного циклического режима функционирования гигрометра требует наличия усилителя сигнала и соответствующего источника питания. Управление охлаждающим элементом осуществляется по сигналу датчика точки росы: в момент испарения конденсата с поверхности зеркала указанный датчик формирует командный сигнал на активацию охлаждающего элемента, тем самым инициируя новый цикл охлаждения [47, 48].

Общий вид конденсационного гигрометра точки росы представлен на рисунке 1.7.



Рисунок 1.7 — Общий вид конденсационного гигрометра точки росы

Расширенная неопределённость измерений конденсационного гигрометра точки росы составляет от 0,2 °С до 0,7 °С [49, 50].

1.2.2 Емкостные гигрометры

Наиболее распространенным типом гигрометром является емкостные гигрометры, принцип действия которого основан на зависимости диэлектрической проницаемости гигроскопичного слоя чувствительного элемента от относительной влажности окружающей среды. Как правило, они состоят из двух соединенных друг с другом электродов, покрытых слоем диэлектрика, который чувствителен к изменениям влажности. При поглощении слоем воды объем слоя увеличивается, что приводит к изменению емкости конденсатора [51].

Общий вид ёмкостного гигрометра представлен на рисунке 1.8.



Рисунок 1.8 – Общий вид емкостного гигрометра

Расширенная неопределенность измерения емкостного гигрометра оценивается от 1,0% до 3,0% относительной влажности в диапазоне относительной влажности от 5% до 95% [52].

1.2.3 Резистивные гигрометры

Принцип действия резистивных гигрометров основаны на зависимости электрического сопротивления гигроскопичного слоя чувствительного элемента от относительной влажности окружающей среды. Конструктивным различием от емкостного гигрометра является вместо покрытие слоя диэлектрика, нанесен материал с низким сопротивлением. Часто используется покрытия из керамики и полимера, нанесенного на подложку. Зависимость между сопротивлением и влажностью является обратно пропорциально.

Общий вид резистивного гигрометра представлен на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Общий вид резистивного гигрометра

Расширенная неопределенность резистивного гигрометра оценивается от 1,6% до 3,0% относительной влажности [35].

1.2.4 Электролитические гигрометры

В электролитических или кулонометрических гигрометрах используется ячейка, покрытая тонкой пленкой пятиокиси фосфора (P_2O_5), которая поглощает воду из измеряемого газа. Когда электрический потенциал (напряжение) подается на электроды и вводится в измерительную ячейку, водяной пар, поглощенный P_2O_5, распадается на молекулы водорода и кислорода, генерируя определенный ток. Эта реакция протекает при напряжении не менее 2 В постоянного тока. Результирующий ток электролиза является мерой влажности образца, основанной на законе Фарадея. Сила тока, необходимая для диссоциации воды, пропорциональна количеству молекул воды, присутствующих в образце газа. Было установлено, что кулонометрический датчик является надежным и экономичным инструментом для определения остаточной влажности [53].

Общий вид кулонометрического гигрометра показан на рисунке 1.10.



Рисунок 1.10 – Общий вид кулонометрического гигрометра

Расширенная неопределенность кулонометрического гигрометра оценивается от 2,5% до 10% [54].

1.2.5 Психрометрические гигрометры

Психрометрические гигрометры представляют собой самостоятельный класс средств измерений относительной влажности, функционирующих на основе термодинамических соотношений. Особенность данных приборов заключается в том, что в процессе измерения они оказывают воздействие на влажность окружающей среды. Расчёт относительной влажности производится на основании показаний «сухого» и «влажного» термометров по психрометрическим таблицам в соответствии с ГОСТ Р 8.811-2012 [55].

Калибровка психрометра по относительной влажности предъявляет к системе калибровки ряд специфических требований. Первостепенным из них является обеспечение достаточной скорости воздушного потока, омывающего измерительный элемент прибора. Не менее значимым является учёт влияния процесса испарения воды с поверхности фитиля на влагосодержание воздуха непосредственно в зоне измерения, поскольку данный эффект формирует дополнительную составляющую суммарной неопределённости результатов калибровки.

Область применимости поправочных коэффициентов ограничена техническим состоянием конкретного экземпляра психрометра и степенью соблюдения регламентированных процедур его эксплуатации, включая применение химически чистой воды и своевременную замену фитилей резервуаров термометров по мере их увлажнения [56].

Введение поправки на скорость воздушного потока представляет собой существенный элемент расчётной процедуры определения относительной влажности по показаниям психрометра, поскольку её применение обеспечивает снижение суммарной неопределённости получаемых результатов измерений.

Общий вид психрометрического гигрометра представлен на рисунке 1.11.



Рисунок 1.11 — Общий вид психрометрического гигрометра

Расширенная неопределённость психрометрического гигрометра принимает значения в диапазоне от 3,4 % до 13 % в области рабочих температур от плюс 15 °С до плюс 50 °С [57–59].

1.3 Государственные эталоны влажности газов Республики Казахстан до проведения модернизации

В рамках обеспечения единства измерений влажности газов на территории Республики Казахстан установлены два государственных эталона: эталон единицы относительной влажности (регистрационный номер KZ.01.01.00033-2007) и эталон единицы температуры точки росы/инея (регистрационный номер KZ.01.01.00062-2017).

В состав Государственного эталона единицы относительной влажности включены следующие средства измерений:

— генератор влажного воздуха Humilab, предназначенный для поверки и калибровки незондовых гигрометров в диапазоне относительной влажности от 10 % до 90 % при абсолютной погрешности ±1,0 %;

— генератор влажного воздуха HygroGen 2A, применяемый для поверки и калибровки зондовых гигрометров в диапазоне относительной влажности от 5 % до 95 % при абсолютной погрешности ±1,0 %;

— конденсационный гигрометр MBW 473-RP2, обеспечивающий измерения в диапазоне от 5 % до 95 % при абсолютной погрешности ±0,5 %;

— термогигрометр Rotronic HP32 с диапазоном измерений от 5 % до 95 % при абсолютной погрешности ±1,0 % [60].

Принцип действия генераторов влажного воздуха основан на методе смешивания потоков влажного и осушенного воздуха, управляемого датчиком ёмкостного типа в генераторе HygroGen 2A и датчиком конденсационного типа в генераторе Humilab.

Метрологическая прослеживаемость измерений единицы относительной влажности обеспечивается посредством калибровки конденсационных гигрометров MBW 473-RP2 по каналу температуры точки росы с последующим пересчётом в значение относительной влажности в соответствии с формулами Харди [61].

В состав Государственного эталона единицы температуры точки росы/инея входят следующие средства измерений:

- система калибровки точки росы DCS80 с диапазоном измерений от минус 80 °С до плюс 20 °С и абсолютной погрешностью ±0,1 °С, в состав которой входит конденсационный гигрометр S8000 RS;
- конденсационный гигрометр S4000 с диапазоном измерений от минус 50 °С до плюс 20 °С и абсолютной погрешностью ±0,1 °С [62].

Принцип действия системы калибровки точки росы основан на методе смешивания потоков влажного и осушенного воздуха, регулируемого посредством набора игольчатых клапанов-регуляторов расхода.

Метрологическая прослеживаемость измерений температуры точки росы/инея обеспечивается посредством калибровки конденсационного гигрометра S8000 RS в национальных метрологических институтах зарубежных государств.

Для каждой из воспроизводимых единиц величины, закреплённых за соответствующими государственными эталонами, разработаны и введены в действие государственные поверочные схемы для средств измерений:

- на основе Государственного эталона единицы относительной влажности разработан СТ РК 2.114-2006 «Государственный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений относительной влажности газов» [2];
- на основе Государственного эталона единицы температуры точки росы/инея разработан СТ РК 2.415-2016 «Государственный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений температуры точки росы/инея газов» [3].

Указанные государственные поверочные схемы предусматривают исключительно непосредственную передачу единицы величины от государственного эталона к рабочим средствам измерений, без промежуточных ступеней передачи.

Схема метрологической прослеживаемости единицы температуры точки росы/инея и единицы относительной влажности представлена на рисунке 1.12.

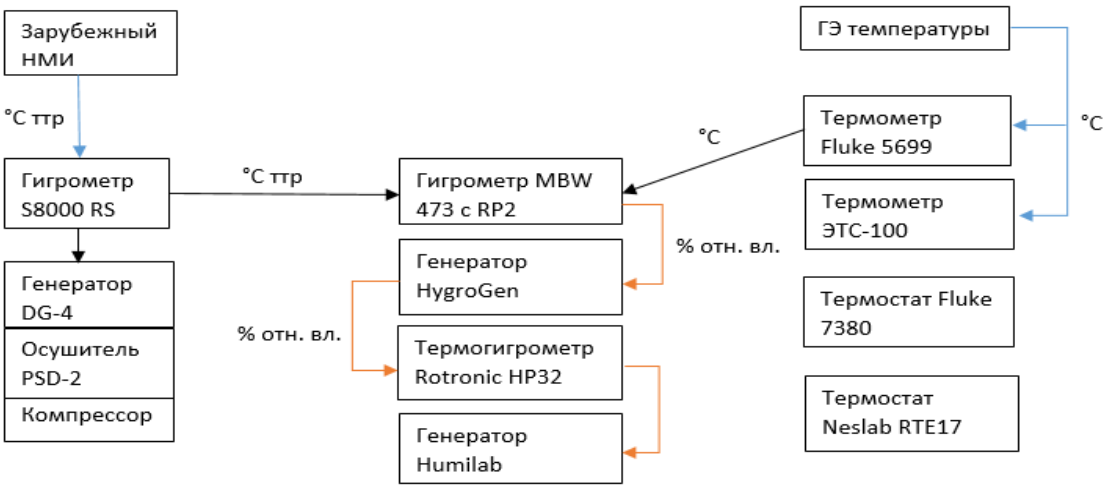


Рисунок 1.12 — Метрологическая прослеживаемость единицы температуры точки росы/инея и единицы относительной влажности

Обеспечение метрологической прослеживаемости рабочих эталонов влажности поверочных и калибровочных лабораторий Республики Казахстан предполагает охват следующих диапазонов измерений:

— по температуре точки росы/инея: от минус 80 °С до плюс 50 °С при абсолютной погрешности ±0,1 °С;

— по относительной влажности: от 2 % до 98 % при абсолютной погрешности ±1,0 %;

— по объёмной доле влаги: от 0 млн$^{-1}$ до 460 000 млн$^{-1}$ при относительной погрешности ±1,5 % [63].

1.4 Конструкции первичных генераторов точки росы, используемых в различных НМИ

В настоящем разделе представлен систематизированный обзор первичных генераторов температуры точки росы/инея, эксплуатируемых в ведущих национальных метрологических институтах (НМИ). Подробные сведения о конструктивном исполнении, схемотехнических особенностях и метрологических характеристиках каждой из рассматриваемых установок изложены в первоисточниках, ссылки на которые приведены далее по тексту. Следует особо подчеркнуть, что период с момента публикации цитируемых работ до настоящего времени характеризуется существенной модернизацией эталонных комплексов рассматриваемых лабораторий: ряд НМИ ввёл в эксплуатацию дополнительные установки, скорректировал условия применения существующих генераторов, расширил диапазоны воспроизводимых величин и уточнил оцениваемые значения расширенной неопределённости. Вместе с тем фундаментальные технические принципы, положенные в основу анализируемых конструкций, и концептуальные подходы к решению задачи воспроизведения единицы температуры точки росы сохраняют свою актуальность и не претерпели принципиальных изменений за указанный период.

Национальная физическая лаборатория (NPL), Великобритания

Генератор точки росы Национальной физической лаборатории Великобритании, конструкция которого детально представлена в работе [107], построен по однодавленческой схеме (1-P) и допускает работу в режиме частичной рециркуляции газа-носителя. Установка скомпонована из двух последовательно включённых функциональных блоков — модуля предварительного насыщения и финального насытителя; каждый из этих блоков снабжён независимым контуром термостатирования, что позволяет реализовывать различные температурные стратегии на разных ступенях насыщения. Предварительная ступень обеспечивает первичное обогащение газа водяным паром при температурах, превышающих минус 50 °С. Поскольку коэффициент эффективности насыщения на этой ступени заведомо ниже единицы, её рабочую температуру намеренно устанавливают существенно выше температуры окончательного насыщения — такой режим гарантирует, что окончательная точка росы будет однозначно определяться температурой именно финального насытителя.

Регулирование входного давления сухого газа осуществляется редуктором, поддерживающим стабильное абсолютное значение на входе системы, а контроль объёмного расхода реализован массовым расходомером. Конструкция насытителя представляет собой свёрнутую в спираль трубу из нержавеющей стали с внутренним диаметром три четверти дюйма; функционально она совмещает роль теплообменника и собственно зоны фазового равновесия. Горизонтально ориентированные участки спирали частично заполнены водой или льдом — в зависимости от рабочего диапазона температур. Распределение процесса насыщения вдоль теплоизолированных секций трубы позволяет увеличивать эффективную длину контакта газа с водной (ледяной) поверхностью без существенного увеличения паразитной тепловой нагрузки на соседние ступени установки. Количественная оценка эффективности насыщения выполняется методом последовательного наращивания длины активного участка с одновременной регистрацией соответствующего смещения значения точки росы на выходе из насытителя. Расчёт точки росы выполняется по результатам прямых измерений температуры и давления на выходной магистрали; для этого в газовом потоке непосредственно за насытителем установлен платиновый термометр сопротивления (PRT). При обработке результатов принимается гипотеза о термодинамическом равновесии между газовой фазой и поверхностью конденсата. Конструктивное ограничение на минимальный внутренний диаметр участков трубопровода — не менее половины дюйма — введено с целью минимизации гидродинамических потерь и связанных с ними градиентов давления вдоль тракта.

Центр метрологии и аккредитации (MIKES), Финляндия

Первичный генератор точки росы финского центра MIKES, подробно описанный в работе [15], выполнен по схеме однодавленческого генератора (1-P) с возможностью работы в режиме частичной рециркуляции газового потока. Особенностью эксплуатации установки в диапазоне отрицательных температур точки инея является переход на режим полной рециркуляции; такой подход решает критическую проблему обмерзания внутренних поверхностей преднасытителя, неизбежно возникающего при подаче в систему свежего влажного воздуха. Циркуляционный насос вместе с парком поверяемых средств измерений конструктивно вынесен в отдельный теплоизолированный отсек, расположенный над основным блоком генератора, что обеспечивает термическую развязку измерительной части от подверженных нагреву агрегатов.

С точки зрения функциональной декомпозиции генератор включает три последовательно соединённых узла: модуль предварительного насыщения, теплообменник и финальный (основной) насытитель. Преднасытитель компонуется из двух вертикальных цилиндрических ёмкостей, одна из которых частично заполнена дистиллированной водой; принцип его действия основан на барботировании входного потока воздуха через водяной столб, что обеспечивает

быстрое первичное насыщение газа водяным паром. При работе в области отрицательных температур секция предварительного насыщения переводится в сухой режим — водяная фаза удаляется и через цилиндры пропускается сухой газ, что исключает образование льдяных пробок.

Основной (финальный) насытитель выполнен в виде горизонтально ориентированной трубки из нержавеющей стали с внутренним диаметром 26 мм; на её выходном конце установлен вертикальный цилиндрический коллектор. Рабочий объём насытителя приблизительно наполовину заполнен водой (в режиме положительных температур) или льдом (при отрицательных температурах). Температура насыщения регистрируется двумя платиновыми термометрами сопротивления номинального сопротивления R_0 = 100 Ом, размещёнными в принципиально разных точках: первый ПТС погружён в водяную (или ледяную) фазу и измеряет её температуру, второй установлен в газовом потоке над фазовой поверхностью — в полости вертикального коллектора. Такой двухточечный температурный контроль обеспечивает одновременную оценку температуры обеих фаз системы, что критически важно для определения степени их термодинамического равновесия и позволяет количественно характеризовать остаточную неполноту насыщения, связанную с конечной скоростью массообмена между фазами.

Лаборатория Ван Свинден (VSL), Нидерланды

Основной генератор точки росы голландской лаборатории VSL, конструкция которого изложена в работе [126], реализует однодавленческую схему (1-P) с возможностью работы в режиме частичной рециркуляции газа-носителя. Архитектурно установка построена на основе двух параллельных насытителей — низкотемпературного и высокотемпературного — каждый из которых помещён в собственную термостатируемую жидкостную ванну. Низкотемпературный блок обеспечивает воспроизведение точки росы/инея в диапазоне от минус 60 °C до плюс 20 °C, в то время как высокотемпературный охватывает интервал от плюс 5 °C до плюс 82 °C; такое разделение диапазонов позволяет оптимизировать конструкцию и теплоносители каждого из блоков под соответствующие физико-химические условия.

Низкотемпературная ветвь установки содержит медный теплообменник и собственно насытитель, также изготовленный из меди и покрытый снаружи и со стороны контакта с газом тонким слоем электролитического золота — этот защитный слой выполняет функцию антикоррозионного барьера, не допуская растворения металла основы в водяном паре и предотвращая загрязнение генерируемой влаги ионами меди. Высокотемпературный блок имеет более сложную трёхступенчатую структуру: преднасытитель, теплообменник и финальный насытитель, соединённые последовательно. Корпус преднасытителя выполнен комбинированным — из нержавеющей стали со встроенными смотровыми элементами из

боросиликатного стекла; в его конструкцию интегрирован пьезоэлектрический генератор аэрозоля, формирующий мелкодисперсный туман водяных капель с характерным размером десятки микрометров. Распыление воды многократно увеличивает площадь межфазного контакта в единице объёма и сдвигает систему к состоянию полного насыщения за существенно меньшее время пребывания газа в насытителе. По принципиальной компоновке финальный насытитель высокотемпературной ступени аналогичен низкотемпературному блоку.

Подача сухого газа в систему регулируется массовым расходомером-регулятором; объёмный расход газа в контуре рециркуляции независимо контролируется отдельным массовым расходомером. Циркуляция газового потока обеспечивается трёхлопастным центробежным насосом, валовой узел которого проходит через вакуумно-плотное уплотнение; результаты эксплуатационных испытаний подтвердили работоспособность данного узла при температурах свыше 100 °C без признаков механических повреждений и значимого газовыделения, способного исказить состав парогазовой смеси. Подшипниковые узлы насоса смазаны химически инертной композицией, не взаимодействующей с водяным паром в рабочем диапазоне температур. Для упрощения процедур технического обслуживания на ключевых магистралях установлены шаровые краны, паспортно рассчитанные на эксплуатацию вплоть до 290 °C. Все детали, имеющие непосредственный контакт с газовым потоком, изготовлены из нержавеющей стали; седло и шток затворных клапанов выполнены из полиэфирэфиркетона (PEEK) — материала, обладающего пренебрежимо малой паропроницаемостью, что критически важно для исключения утечек водяного пара через уплотнительные поверхности. Управление запорной и регулирующей арматурой полностью автоматизировано с применением пневматических исполнительных механизмов, рассчитанных на устойчивую работу при температурах до 200 °C.

В ходе планового профилактического осмотра 2009 года на поверхности насытителя низкотемпературного блока были выявлены характерные тёмные включения, идентифицированные как продукты коррозионного процесса [127]. Анализ причин повреждения позволил установить два основных фактора: во-первых, недостаточная исходная толщина золотого покрытия, не обеспечивающая необходимого ресурса работы в условиях многолетней циклической эксплуатации; геометрическая неоднородность электрического поля при гальваническом нанесении покрытия привела к формированию участков с пониженной локальной толщиной слоя. Во-вторых, периодические термические нагрузки, сопровождающиеся существенными различиями коэффициентов теплового расширения золотого покрытия, никелевого подслоя и медной основы, обусловили накопление механических напряжений на границах слоёв и постепенное снижение адгезии золотого покрытия к основе. По результатам комплексного технического анализа выявленных дефектов было принято решение

об изготовлении нового насытителя из коррозионностойкой стали без металлических покрытий [127].

Федеральное ведомство по метрологии (BEV) / E+E Elektronik, Австрия

Поддержание национального эталона влажности Австрийской Республики на основе соответствующего поручения BEV технически обеспечивается компанией E+E Elektronik [128]. Эталонный генератор точки росы [128] реализован по двухдавленческой схеме (2-P) и компонуется из четырёх ключевых функциональных узлов: блока предварительного насыщения с независимым температурным контуром, теплообменника и двух идентичных финальных насытителей, совместно выполняющих функцию конденсатора водяного пара.

Конструкция насытителей предусматривает работу как в режиме конденсации (при положительных и слабоотрицательных температурах с превышением точки росы над температурой стенок), так и в испарительном режиме (при необходимости генерации высокоувлажнённого газового потока). При работе в области отрицательных температур точки инея допускается схемотехническое исключение преднасытителя из газового тракта — режим, обеспечивающий упрощение схемы и исключающий риск обмерзания на этой ступени. Каждый из насытителей изготовлен методом механической обработки монолитной заготовки из нержавеющей стали; внутренняя поверхность сформирована в виде змеевидного канала прямоугольного поперечного сечения с развитым оребрением, обеспечивающим интенсификацию процессов конденсации и фазового равновесия за счёт многократного увеличения активной площади. Предельно допустимое рабочее давление контура составляет 9 400 гПа, что обеспечивает значительный технический запас по отношению к типовым режимам эксплуатации генератора в диапазоне точек росы. Регулируемый дроссель с обогревом, выполненный по схеме игольчатого клапана, обеспечивает контролируемое снижение давления газа на выходе насытителя при переходе в зону пониженного давления. Параллельно дросселю включена байпасная линия с собственным запорным элементом, посредством которой возможно переключение установки из двухдавленческого в однодавленческий режим работы без её механической перекомпоновки.

Лаборатория измерения технологических процессов (LPM), Хорватия

Метрологический комплекс хорватской лаборатории LPM включает два эталонных генератора точки росы: высокотемпературный, охватывающий диапазон от плюс 1 °C до плюс 60 °C, и низкотемпературный, рассчитанный на воспроизведение от минус 70 °C до плюс 5 °C [13]. Конструкция насытителей разработана при непосредственном участии специалистов финского центра метрологии MIKES — это обстоятельство объясняет наблюдаемую преемственность ключевых технических решений и сходство компоновки с финским аналогом.

Обе установки реализуют однодавленческую однопроходную схему (1-P) и компонуются из четырёх последовательно соединённых функциональных узлов: увлажнителя, преднасытителя, теплообменника и финального насытителя.

В низкотемпературной установке увлажнитель работает при комнатной температуре около плюс 20 °C и включён в гидравлическую схему параллельно вспомогательной спиральной трубке. Соотношение гидравлических сопротивлений этих двух параллельных ветвей подобрано таким образом, чтобы примерно 50 % входного сухого воздуха проходило через увлажнитель и насыщалось влагой, в то время как оставшаяся половина обходила увлажнитель, сохраняя исходное низкое влагосодержание. При работе в диапазоне крайних отрицательных температур точки инея увлажнитель полностью отключается посредством запорного клапана — в этом режиме поток сухого газа подаётся непосредственно в систему охлаждения. Преднасытитель выполнен в виде вертикально ориентированного цилиндра, частично заполненного водой (либо льдом — в зависимости от рабочего диапазона) и полностью погружённого в основную термостатируемую жидкостную ванну установки. Охлаждение газового потока до целевой температуры финального насыщения происходит в спиральном теплообменнике, в котором одновременно протекает процесс конденсации избыточного водяного пара. Финальный насытитель сконструирован в форме камеры с прямоугольным поперечным сечением и оснащён внутренней разделительной перегородкой; перегородка выполняет двоякую функцию — увеличивает эффективную длину пути газового потока внутри камеры и создаёт условия для турбулизации потока, обеспечивая полное насыщение газа на выходе.

Температурный контроль зоны насыщения реализован с помощью двух платиновых термометров сопротивления (PRT): первый размещён внутри камеры финального насыщения в защитной трубке с регулируемым малым потоком воздуха, продуваемым вдоль штока термометра для снижения паразитной теплопроводности по чувствительному элементу к окружающей среде; второй PRT установлен в жидкостной ванне непосредственно вблизи финального насытителя и характеризует температуру теплоносителя в зоне термической стабилизации. Выходной трубопровод установки оснащён дополнительной конденсационной спиралью, термостатируемой при температуре, приближённой к температуре финального насыщения; эта спираль выполняет роль конечного балансёра, обеспечивая удаление возможного остаточного паросодержания и минимизируя расхождение между фактической точкой росы выходного газа и расчётной температурой насытителя.

Высокотемпературный генератор LPM построен по принципиально аналогичной схеме; вместе с тем имеется ряд эксплуатационных особенностей, обусловленных рабочим диапазоном. Весь объём входного сухого воздуха (100 %) пропускается через увлажнитель без

байпасирования, поскольку при положительных температурах задача состоит не в дозировании, а в максимально полном начальном увлажнении газового потока. Увлажнитель размещён в отдельном термостатируемом корпусе, конструктивно расположенном над основной ванной генератора. В этом режиме блок предварительного насыщения функционально выполняет преимущественно роль конденсатора, обеспечивая удаление избыточной влаги до уровня, соответствующего целевой температуре финального насыщения. Окончательная температура насыщения регистрируется двумя платиновыми термометрами сопротивления, погружёнными в жидкостную ванну в непосредственной близости от финального насытителя.

Лаборатория метрологии и качества (LMK), Словения

Метрологическая инфраструктура словенской лаборатории LMK включает два первичных генератора точки росы [14], построенных по однодавленческой схеме (1-P) и допускающих эксплуатацию во всех трёх характерных режимах: однопроходном, частично рециркуляционном и полностью рециркуляционном. Один из генераторов специализирован под диапазон от минус 50 °C до плюс 20 °C, второй покрывает интервал положительных температур от плюс 20 °C до плюс 95 °C; такое функциональное разделение позволило оптимизировать конструкцию каждого генератора под характерные физико-химические условия соответствующего рабочего диапазона.

Высокотемпературная установка реализует трёхступенчатую схему насыщения, включающую преднасытитель, теплообменник и финальный насытитель; в низкотемпературном генераторе модуль предварительного насыщения исключён из схемы — функции первичного контактирования газа с водной (ледяной) поверхностью совмещены с теплообменником, что упрощает конструкцию и снижает риск конденсационных потерь на промежуточных ступенях. Финальные насытители обоих блоков имеют идентичную базовую геометрию — цилиндрическую форму с осевым проточным каналом, однако различаются эффективной длиной активного участка: около 0,8 м в низкотемпературной установке и около 1,2 м в высокотемпературной. Корпуса насытителей изготовлены из латуни и снабжены электролитическим золотым покрытием со стороны внутренней (контактирующей с водой) поверхности; покрытие выполняет двоякую функцию — предотвращает растворение латуни в водяной фазе и связанное с этим загрязнение генерируемого влажного газа ионами цинка или меди, а также защищает основной материал от коррозионного воздействия влаги при длительной эксплуатации. Крышки насытителей изготовлены из полированной нержавеющей стали, минимизирующей адсорбционно-десорбционные эффекты на внутренних поверхностях. Выбор латуни в качестве материала корпуса насытителя обоснован комплексом теплофизических свойств данного сплава: высокая теплопроводность обеспечивает быстрое выравнивание температурного поля по объёму конструкции, а значительная удельная теплоёмкость,

превосходящая аналогичный показатель нержавеющей стали, способствует термической стабилизации насытителя в переходных режимах работы и положительно сказывается на эффективности насыщения в ряде рабочих условий.

Для реализации режима полной рециркуляции применяется мембранный насос, корпусные элементы которого выполнены из нержавеющей стали, а гибкая мембрана изготовлена из этиленпропилендиенового мономерного каучука (EPDM), обладающего пренебрежимо малой паропроницаемостью — это исключает потерю водяного пара через материал мембраны при многократных прокачиваниях газа через контур. Режим частичной рециркуляции обеспечивается отдельным центробежным насосом, в конструкции которого применена бесконтактная магнитная муфта между приводным электродвигателем и крыльчаткой; такое решение полностью исключает традиционные сальниковые уплотнения вращающегося вала и связанные с ними утечки и адсорбционные потери. Подшипниковые узлы крыльчатки прошли специализированную процедуру обезжиривания и подтвердили работоспособность в режиме непрерывной эксплуатации продолжительностью не менее двух месяцев без признаков механической или химической деградации. Гидравлический перепад давления, создаваемый насосом в номинальном диапазоне расходов, не превышает 100 Па, что обеспечивает практически изобарические условия циркуляции по контуру. Все внутренние поверхности, имеющие непосредственный контакт с газовым потоком, подвергнуты электрохимическому полированию и последующей промывке высокочистыми органическими растворителями — комплекс этих процедур существенно снижает влияние адсорбционно-десорбционных эффектов и связанных с ними отклонений между фактическим и расчётным значениями точки росы на выходе.

Национальный институт метрологии Италии (INRiM), Италия

В состав эталонной базы итальянского института INRiM входят два ключевых генератора точки росы, описанные в работах [129, 130]; обе установки построены по однодавленческой схеме (1-P) и допускают функционирование как в однопроходном режиме, так и в режиме частичной рециркуляции газа-носителя.

Первый из генераторов специализирован под воспроизведение температуры точки инея в области отрицательных температур и реализует следующую газодинамическую схему: поток газообразного азота (N_2), используемого в качестве газа-носителя, последовательно направляется через секцию охлаждения (теплообменник) и далее протекает над ледяной поверхностью изотермического насытителя, размещённого в высокостабильной термостатирующей жидкостной ванне. Геометрия насытителя обеспечивает многократный контакт газового потока с ледяной фазой, что приводит к достижению устойчивого равновесного насыщения. Контроль

температуры насыщения реализован двумя платиновыми термометрами сопротивления, размещёнными на выходе из насытителя в принципиально различных позициях: один установлен непосредственно в толще льда и регистрирует температуру конденсированной фазы, второй размещён в воздушном (газовом) потоке над поверхностью льда и измеряет температуру самого газа. Объёмный расход газа-носителя через основной канал составляет от 3 до 10 л/мин; через ответвление, подающее газ к поверяемому гигрометру, расход поддерживается в диапазоне от 0,5 до 1,5 л/мин.

Второй генератор INRiM, специализированный под воспроизведение температуры точки росы в области преимущественно положительных температур, выполнен по полнорециркуляционной схеме и обеспечивает воспроизведение в диапазоне от минус 15 °C до плюс 90 °C. Конструкция допускает использование в качестве газа-носителя как азота, так и атмосферного воздуха; такая гибкость по составу газовой матрицы расширяет область применимости генератора для калибровки различных типов гигрометров. Система насыщения реализована в виде вытянутой камеры с принудительной организацией газового потока над поверхностью воды (или льда — в зоне отрицательных температур); полная протяжённость зоны фазового контакта составляет 1,2 м. Температурный контроль зоны насыщения существенно усложнён по сравнению с первым генератором и реализован тремя парами платиновых термометров сопротивления, размещёнными в трёх последовательных секциях камеры насыщения. В каждой паре один термометр расположен непосредственно под поверхностью воды на глубине, не превышающей 10 мм, и регистрирует температуру водяной фазы, второй установлен в газовом потоке над ним и регистрирует температуру газа. Дополнительный массив датчиков по длине камеры позволяет с высокой пространственной разрешающей способностью оценить продольный градиент температуры и тем самым уточнить значение эффективной температуры насыщения. Пара ПТС, установленная в концевой секции (на выходе из камеры насыщения), служит для определения рабочей температуры насытителя как такового.

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ), Россия

В состав государственного первичного эталона единицы относительной влажности газов, молярной (объёмной) доли влаги, температуры точки росы/инея и температуры конденсации углеводородов ГЭТ 151-2020 включены два эталонных генератора, реализующие принципиально различные физические методы воспроизведения единицы. Первый генератор основан на методе фазового равновесия и рассчитан на воспроизведение температуры точки росы/инея в диапазоне от минус 60 °C до плюс 15 °C; второй реализует метод двух давлений и обеспечивает воспроизведение точки росы в диапазоне от плюс 5 °C до плюс 90 °C. Такая комплементарная

пара генераторов обеспечивает полное перекрытие практически значимого диапазона воспроизведения единицы с применением физически независимых методов реализации, что повышает достоверность воспроизводимой шкалы за счёт возможности взаимной верификации в области перекрытия диапазонов.

Сжатый газ, подаваемый на вход эталонного комплекса, проходит через редуктор давления, обеспечивающий регулирование абсолютного значения в диапазоне от 0,1 до 2 МПа. Далее газовый поток последовательно проходит через теплообменник и систему насыщения, в которой реализуется собственно метод фазового равновесия. По завершении насыщения давление полученного влажного газа снижается до атмосферного посредством изотермического дросселирующего устройства, конструкция которого минимизирует тепловые эффекты адиабатического расширения и сопутствующее им изменение температуры точки росы.

Высокотемпературный генератор использует барботажную схему насыщения, в которой подаваемый газ последовательно проходит через три ступени водяных столбов, каждая высотой 0,2 м, что обеспечивает интенсивный массообмен с большой площадью газожидкостного контакта на единицу длины тракта. Низкотемпературный генератор имеет принципиально иную организацию: входной газ предварительно осушается в отдельном генераторе сухого газа, что полностью исключает возможность обмерзания трубопроводов на ступенях охлаждения. Термостатирование низкотемпературной установки реализовано на основе спиртовой рабочей жидкости с криогенным охлаждением жидким азотом — такое решение обеспечивает необходимую теплоёмкость теплоносителя и достижимый температурный диапазон, недоступный при использовании менее холодных хладагентов. Система насыщения низкотемпературного генератора компонуется из последовательно соединённых пластин диаметрами 82 мм и 120 мм, оснащённых центральными осевыми направляющими; такая компоновка обеспечивает интенсивный теплообмен между газовым потоком и поверхностью льда (либо воды), компенсирует локальные температурные потери и поддерживает температурную однородность в зоне насыщения. Суммарная протяжённость пути газа над поверхностью конденсированной фазы (льда или воды) в данной конструкции достигает 2,4 м [120–123], что обеспечивает эффективное насыщение даже в области крайних отрицательных температур точки инея, где скорость массообмена существенно снижается.

Национальный институт стандартов и технологий (NIST), США

Основу эталонной базы NIST в области воспроизведения единицы температуры точки росы/инея составляют две специализированные установки: гибридный генератор влажности HHG (Hybrid Humidity Generator), предназначенный для воспроизведения температуры точки росы в области положительных и слабоотрицательных температур [30–33], и

низкотемпературный генератор с фиксированной точкой замерзания LFPG (Low Frost-Point Generator), используемый для воспроизведения температуры точки инея в области глубоких отрицательных температур [131].

Гибридный генератор HHG реализует двухдавленческую схему (2-P). Подаваемый на вход воздушный поток с типовым объёмным расходом порядка 30 л/мин однократно проходит через насытитель с прецизионно контролируемой температурой, в котором поддерживается избыточное давление относительно атмосферного. Молярная доля водяного пара на выходе из насытителя определяется расчётным путём на основании прецизионно измеренных значений температуры и давления газа в зоне насыщения. Результирующее значение температуры точки росы/инея получается математической обработкой полученной молярной доли с применением табулированных значений давления насыщенного водяного пара.

Низкотемпературный генератор LFPG функционирует по близкому принципу, однако имеет ряд существенных конструктивных и эксплуатационных особенностей, обусловленных спецификой работы в области криогенных точек инея. В качестве рабочего газа-носителя применяется не атмосферный воздух, а газообразный азот высокой чистоты — этот выбор обусловлен соображениями химической инертности и контролируемой влагосодержанием на входе; объёмный расход через насытитель составляет 2 л/мин, что более чем на порядок ниже соответствующего показателя HHG и связано с необходимостью обеспечения полного фазового равновесия в области криогенных температур, где скорость массообмена существенно ограничена. Насытитель содержит ледяную фазу, а перепад давления между внутренней полостью насытителя и точкой подачи газа на выходе генератора (так называемая «точка интереса») поддерживается на минимально достижимом технически уровне. Температура инея в точке подачи принимается численно равной измеренной температуре насытителя с введением небольшой поправки на остаточный перепад давления, рассчитываемой на основании уравнения Клаузиуса—Клапейрона. Для минимизации адсорбционно-десорбционных эффектов на внутренних поверхностях газового тракта генератора LFPG все контактирующие с газом поверхности трубопроводов подвергнуты электрохимическому полированию, обеспечивающему многократное снижение шероховатости и связанного с ней адсорбционного потенциала.

Метрологическая прослеживаемость воспроизводимой единицы к Международной системе единиц (SI) обеспечивается через прямые измерения температуры и давления в характерных точках насытителя. Высокая точность температурных измерений достигается путём калибровки эталонного платинового термометра сопротивления (SPRT), расположенного в насытителе, по реперным точкам Международной температурной шкалы МТШ-90, воспроизводимым средствами NIST. Прецизионные измерения сопротивления SPRT

обеспечиваются эталонными резисторами, прошедшими калибровку по эталонам сопротивления NIST. Прослеживаемость показаний обоих манометров системы (избыточного давления в насытителе и атмосферного давления) реализуется через калибровку по эталонам давления NIST, что замыкает цепь прослеживаемости к национальной реализации единиц SI.

1.5 Результаты международных сличений НМИ

В настоящем разделе систематизированы результаты ключевых и дополнительных международных сличений в области измерений влажности, проведённых за последние два десятилетия под эгидой Консультативного комитета по термометрии (CCT) МБМВ и шести региональных метрологических организаций. Совокупность сличений серии K6 (по температуре точки росы/инея) и K8 (по высокотемпературной точке росы) формирует объективную основу для взаимного признания результатов калибровки в рамках Соглашения CIPM MRA.

Сличения CCT МБМВ

Перечень ключевых сличений, организованных непосредственно Консультативным комитетом по термометрии, представлен в таблице 1.1. Данные сличения имеют статус эталонных и формируют опорное значение (KCRV) для соответствующих диапазонов.

Таблица 1.1 — Ключевые сличения CCT МБМВ в области измерений влажности

Обозначение	**Диапазон воспроизведения**	**Год завершения**
CCT-K6	от минус 50 °C до плюс 20 °C	2015
CCT-K6.2	от минус 70 °C до минус 30 °C	2020
CCT-K8	от плюс 30 °C до плюс 95 °C	2025

Региональные сличения

Региональные сличения проводятся как ответвления соответствующих сличений уровня CCT (с привязкой к одному опорному значению), а также как самостоятельные сличения, ориентированные на специфические диапазоны и типы измеряемых величин региона. Сводная информация по сличениям шести региональных организаций — APMP (Азиатско-Тихоокеанская метрологическая программа), AFRIMETS (Внутриафриканская), COOMET (Евро-Азиатская), EURAMET (Европейская), GULFMET (стран Персидского залива) и SIM (Межамериканская) — приведена в таблице 1.2 по состоянию на 20 января 2026 г.

Таблица 1.2 — Ключевые (K) и дополнительные (S) сличения региональных метрологических организаций в области измерений влажности

Регион	**Обозначение**	**Диапазон воспроизведения**	**Завершение / Статус**
APMP	APMP.T-K6	от минус 60 °C до плюс 20 °C	2007
APMP	APMP.T-K8	от плюс 30 °C до плюс 95 °C	2021
APMP	APMP.T-K6.2013	от минус 50 °C до плюс 20 °C	проект B
APMP	APMP.T-S13	от минус 90 °C до минус 60 °C	проект A
APMP	APMP.T-S14	отн. влажность 10 — 95 % при +5, +23, +50 °C	проект A
AFRIMETS	AFRIMETS.T-S4	отн. влажность 10 — 95 % при +5, +25, +55 °C	2014
COOMET	COOMET.T-K6.1	от минус 50 °C до плюс 20 °C	2025
COOMET	COOMET.T-K6.2	от минус 50 °C до плюс 20 °C	отчёт в подготовке
COOMET	COOMET.T-S3	отн. влажность 30 — 90 % при +23 °C	2020
COOMET	COOMET.T-S5	отн. влажность 10 — 90 % при +10, +23, +50 °C	2026
EURAMET	EURAMET.T-K6.1	от минус 70 °C до плюс 20 °C	2013
EURAMET	EURAMET.T-K8	от плюс 30 °C до плюс 95 °C	2024
EURAMET	EUROMET.T-K6	от минус 50 °C до плюс 20 °C	2008
GULFMET	GULFMET.T-S1	отн. влажность 11 — 95 % при 0, +23, +70 °C	проект A
GULFMET	GULFMET.T-S1.2024	отн. влажность 10 — 90 % при +10, +23, +50 °C	измерения проводятся
SIM	SIM.T-K6.1	от минус 25 °C до плюс 20 °C	2015
SIM	SIM.T-K6.2	от минус 20 °C до плюс 20 °C	2014
SIM	SIM.T-K6.3	от минус 30 °C до плюс 20 °C	2015
SIM	SIM.T-K6.4	от минус 20 °C до плюс 60 °C	2013
SIM	SIM.T-K6.5	от минус 40 °C до плюс 20 °C	2016
SIM	SIM.T-K6.7	от минус 30 °C до плюс 60 °C	2020
SIM	SIM.T-K6.8	от минус 10 °C до плюс 20 °C	проект B
SIM	SIM.T-S10	отн. влажность 30 — 90 % при +20, +40 °C	2021

Из таблицы 1.2 видно, что наибольшее число отдельных сличений приходится на SIM, что отражает применяемый в этой организации подход многоступенчатой сети двусторонних и групповых сличений с относительно небольшим числом участников каждое. Для настоящего исследования особый интерес представляет ключевое сличение COOMET.T-K6.1, завершённое в 2025 году с участием РГП «КазСтандарт» и ФГУП «ВНИИФТРИ»; его результаты подробно рассматриваются в главе 3.

Систематизация первичных генераторов влажности НМИ

По результатам обработки отчётов всех перечисленных выше сличений выполнена идентификация первичных генераторов влажности, эксплуатируемых в участвовавших НМИ. Для каждой установки определены: тип схемы воспроизведения (однонапорная 1-P, двухнапорная 2-P, гибридная HHG или вторичная схема S), фактический диапазон воспроизведения и максимальная расширенная неопределённость U(k = 2). Сводные данные приведены в таблицах 1.3 (основной диапазон от минус 50 до плюс 20 °C) и 1.4 (крайние диапазоны).

Таблица 1.3 — Первичные генераторы влажности НМИ в диапазоне точки росы/инея от минус 50 °C до плюс 20 °C

НМИ	**Страна**	**Тип**	**Диапазон, °C**	**U(k = 2), °C**
VNIIFTRI	Россия	1-P	−50…+20	± 0,058
DELTA	Дания	S	−50…+20	± 0,129
BEV/E+E	Австрия	2-P	−50…+20	± 0,025
CMS	Сингапур	2-P	−50…+20	± 0,060
SCL	Гонконг	S	−50…+20	± 0,120
GUM	Польша	1-P	−50…+20	± 0,062
MIKES	Финляндия	1-P	−50…+20	± 0,061
KRISS	Южная Корея	2-P / 1-P	−5…+20/−65…−10	± 0,056
SIRIM	Малайзия	2-P	−50…+20	± 0,026
CETIAT	Франция	1-P	−50…+20	± 0,043
CMI	Чехия	S	−50…+20	± 0,187
EIM	Греция	1-P	−30…+20	± 0,037
MKEH	Венгрия	S	−50…+20	± 0,052
INTA	Испания	2-P	−50…+20	± 0,059
NIM	Китай	2-P	−50…+20	± 0,119
NMIJ	Япония	2-P	−50…+20	± 0,100
NMC	Сингапур	2-P	−50…+20	± 0,083

Продолжение таблицы 1.3

НМИ	**Страна**	**Тип**	**Диапазон, °C**	**U(k = 2), °C**
NIST	США	2-P	−50…+20	± 0,060
SMU	Словакия	S	−50…+20	± 0,257
SP	Швеция	1-P	−50…+1	± 0,161
METAS	Швейцария	1-P	−50…+20	± 0,205
UME	Турция	1-P	−50…+20	± 0,080
MIRS	Словения	1-P	−50…+20	± 0,029
LPM	Хорватия	1-P	−10…+20	± 0,100
IPQ	Португалия	S	−10…+20	± 0,197
INRIM	Италия	1-P	−50…+20	± 0,058
NMISA	Южная Африка	S	−50…+20	± 0,062
NML	Ирландия	S	−10…+20	± 0,063
NPL	Великобритания	1-P	−50…+20	± 0,071
NMI-VSL	Нидерланды	1-P	−50…+20	± 0,134
JV	Норвегия	S	−50…+20	± 0,172
PTB	Германия	2-P	−50…+20	± 0,023

Таблица 1.4 — Первичные генераторы влажности НМИ в крайних диапазонах точки росы/инея

Диапазон	**НМИ**	**Страна**	**Тип**	**Конкретный диапазон, °C**	**U(k = 2), °C**
Криогенный (−80…−50 °C)	NIST	США	HHG	−80…−30	± 0,092
Криогенный (−80…−50 °C)	NMIJ	Япония	1-P	−80…−30	± 0,400
Высокотемпературный (+30…+95 °C)	BEV/E+E	Австрия	2-P	+30…+95	± 0,029
Высокотемпературный (+30…+95 °C)	INTA	Испания	2-P	+30…+95	± 0,039
Высокотемпературный (+30…+95 °C)	INRIM	Италия	1-P	+30…+95	± 0,070

Продолжение таблицы 1.4

Диапазон	**НМИ**	**Страна**	**Тип**	**Конкретный диапазон, °C**	**U(k = 2), °C**
Высокотемпературный (+30…+95 °C)	KRISS	Южная Корея	2-P	+30…+95	± 0,074
Высокотемпературный (+30…+95 °C)	NIST	США	HHG	+30…+85	± 0,040
Высокотемпературный (+30…+95 °C)	NMC	Сингапур	2-P	+30…+65	± 0,120
Высокотемпературный (+30…+95 °C)	NMIJ	Япония	2-P	+30…+95	± 0,064
Высокотемпературный (+30…+95 °C)	NPL	Великобритания	1-P	+30…+95	± 0,100
Высокотемпературный (+30…+95 °C)	PTB	Германия	2-P	+30…+80	± 0,062

В криогенном диапазоне точки инея от минус 80 °C до минус 50 °C число участвующих НМИ существенно меньше — это обусловлено повышенной технической сложностью реализации первичных генераторов в указанной области: давление насыщенного водяного пара здесь убывает на несколько порядков, что предъявляет принципиально более строгие требования к коэффициенту эффективности насыщения и чистоте газового тракта.

Обобщающий анализ

Статистическая обработка данных таблицы 1.3 даёт следующую картину распределения первичных генераторов по типам в основном рабочем диапазоне: из 32 рассмотренных НМИ 14 эксплуатируют генераторы однонапорного типа 1-P (≈ 44 %), 10 — двухнапорные генераторы 2-P (≈ 31 %), 8 — вторичные эталонные комплексы типа S (≈ 25 %).

Преобладание схемы 1-P объясняется тремя факторами: концептуальной простотой однонапорной реализации (точка росы определяется температурой насытителя при близком к атмосферному давлении, что упрощает математическую модель и бюджет неопределённости); отсутствием необходимости в прецизионных системах регулирования и измерения избыточного давления, что снижает совокупную стоимость эталонного комплекса; более высокой эксплуатационной отказоустойчивостью за счёт меньшего числа критических подсистем. Двухнапорные генераторы 2-P применяются преимущественно в НМИ, специализирующихся на воспроизведении единицы в широком диапазоне с акцентом на повышенные температуры точки

росы, где схема 2-P даёт существенные преимущества по достижимой неопределённости — это видно из данных таблицы 1.4: типичные значения U(k = 2) для 2-P в высокотемпературной области составляют 0,025 — 0,074 °C, тогда как для 1-P — 0,070 — 0,100 °C. Применение вторичных эталонов типа S оправдано в институтах с ограниченным метрологическим и финансовым ресурсом — такая стратегия позволяет участвовать в системе CIPM MRA через цепочку прослеживаемости к зарубежным первичным эталонам при существенно меньших инвестициях в национальную базу.

1.6 Математическая модель температуры точки росы/инея

Для насытителя, рабочее давление которого превышает давление в поверяемом гигрометре, молярная доля водяного пара рассчитывается по уравнению (1.2) с использованием температуры Ts и давления Ps, измеренных непосредственно в насыщающей полости:

$$x = \frac{e(T_s) \times f(T_s, P_s)}{P_s} \tag{1.2}$$

В двухдавленческом генераторе (2-P) газ проходит через стадию расширения перед поступлением в поверяемый гигрометр. В однодавленческом генераторе (1-P) между насытителем и поверяемым гигрометром наблюдается незначительное падение давления. Молярная доля влаги на выходе остаётся равной молярной доле влаги в насытителе при условии, что в участке между насытителем и поверяемым гигрометром не происходит ни поглощения, ни выделения водяного пара. Молярная доля влаги может быть также выражена через температуру точки росы в точке измерения:

$$x = \frac{e(T_d) \times f(T_d, P_c)}{P_c} \tag{1.3}$$

где Td — температура точки росы в точке измерения, а Pc — давление в этой же точке.

Для генератора 1-P выполняется приближённое равенство Ts ≈ Td, а функция f(T, P) слабо зависит от небольших изменений температуры. Принимая молярные доли влаги в насытителе и в точке измерения равными, уравнения (1.2) и (1.3) решаются совместно, что даёт:

$$e(T_d) = \frac{e(T_s) \times f(T_s, P_s) \times P_c}{f(T_s, P_c) \times P_s} \tag{1.4}$$

В случае генератора 2-P, где $T_s \neq T_d$, можно использовать следующую формулу:

$$e(T_d) \times f(T_d, P_c) = \frac{e(T_s) \times f(T_s, P_s) \times P_c}{P_s} \tag{1.5}$$

который учитывает разницу в коэффициентах усиления при различных давлениях и температурах насыщения в насытителе и точке измерения.

Поправка к давлению, обусловленная разностью высот между финальным насытителем и цифровым барометром, вычисляется следующим образом.

Указанная поправка к атмосферному давлению, возникающая вследствие перепада высот ΔP, определяется по формуле:

$$\Delta P = \rho g h \tag{1.6}$$

где ρ — плотность вещества, g — ускорение свободного падения, h — разность высот между точками измерения.

Плотность воздуха рассчитывается на основе уравнения состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{PM}{RT} \tag{1.7}$$

Молярная масса влажного воздуха в трубопроводе, используемом для измерения давления, определяется из следующего выражения:

$$M = x \times M_{H_2O} + (1 - x) \times M_{air} \tag{1.8}$$

где M_{H_2O} и M_{air} молярная масса воды и воздуха, соответственно.

1.7 Преобразование единицы измерения температуры из значения сопротивления

Температура точки росы/инея измеряется эталонным термометром, в состав которого входят первичный преобразователь — эталонный термометр сопротивления и прецизионный мост сопротивления. Измерение сводится к определению электрического сопротивления платинового чувствительного элемента с последующим пересчётом полученного значения в температуру по градуировочной характеристике.

Индивидуальная калибровка эталонного платинового термометра сопротивления выполняется по реперным точкам Международной температурной шкалы МТШ-90: устанавливается номинальное сопротивление при 0 °C и относительные сопротивления в контрольных реперных точках. По результатам этих измерений рассчитываются персональные градуировочные коэффициенты A, B и C для каждого термометра.

Калибровка эталонного преобразователя температуры (термометрического моста) осуществляется с применением эталонных мер электрического сопротивления с номинальными значениями 0,1 Ом; 1 Ом; 10 Ом; 100 Ом и 1 000 Ом.

Зависимость электрического сопротивления от температуры для платиновых термометров сопротивления с температурным коэффициентом сопротивления α = 0,00385 °C^{-1} регламентируется ГОСТ 6651-2009 (IEC 60751) и описывается следующими выражениями:

- для диапазона измерений от минус 200°С до 0°С:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t-100)t^3] \quad (1.9)$$

- для диапазона измерений от 0°С до 850°С:

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2) \quad (1.10)$$

где R_t -сопротивление термометра сопротивление, Ом, при температуре t, °С;

R_0- номинальное сопротивление термометра сопротивление, Ом, при температуре 0 °С.

Значение постоянных полиномов следующие:

A=3,9083·10^{-3} °C^{-1};

B=-5,775·10^{-7} °C^{-2};

C=-4,183·10^{-12} °C^{-4}.

На основе рассматриваемого уравнения была выведена обратная функция для расчета температуры по сопротивлению:

- для диапазона измерений от минус 200°С до 0°С:

$$t = \sum_{i=1}^{4} D_i (R_t / R_0 - 1)^i \quad (1.11)$$

Значение постоянных полиномов следующие:

D_1=255,819 °C;

D_2=9,1455 °C;

D_3=-2,92363 °C;

D_4=1,7909 °C.

- для диапазона измерений от 0°С до 850°С:

$$t = \frac{\sqrt{A^2 - 4B(1 - R_t / R_0)} - A}{2B} \quad (1.12)$$

Точность расчета температуры на основе сопротивления оценивается в 2 мК [132].

Выводы по главе 1

Проведённый в первой главе анализ состояния метрологического обеспечения измерений влажности газов в Республике Казахстан, обзор конструктивных решений первичных генераторов температуры точки росы в ведущих национальных метрологических институтах и результатов международных ключевых сличений серий К6 и К8 позволили сформулировать следующие основные выводы.

1. Воспроизведение единицы температуры точки росы/инея в национальных метрологических институтах реализуется на основе первичных генераторов влажности четырёх типов — однонапорных (1-P), двухтемпературных (2-T), двухнапорных (2-P) и гибридных. Систематизация данных по 32 НМИ в основном диапазоне от минус 50 °C до плюс 20 °C показала следующее распределение: 44 % институтов эксплуатируют генераторы 1-P, 31 % — 2-P, 25 % применяют вторичные эталонные комплексы. В области повышенных температур точки росы преимущества схемы 2-P проявляются количественно: типовые U(k = 2) составляют 0,025 — 0,074 °C против 0,070 — 0,100 °C для 1-P.

2. Сравнительный анализ конструкций ведущих НМИ (NIST, NPL, PTB, NMIJ, MIKES, ВНИИФТРИ) выделил две группы по охватываемому диапазону — широкодиапазонные эталоны (от минус 80 °C до плюс 90…+95 °C) и среднедиапазонный эталон MIKES (от минус 60 °C до плюс 20 °C), а также три подхода к обеспечению полноты насыщения: большеобъёмные насытители с распылением, проточные многосекционные и среднеобъёмные однопроходные. Электрические измерения температуры во всех современных эталонах выполняются по четырёхпроводной схеме включения эталонных платиновых термометров сопротивления, обеспечивающей относительную неопределённость измерения сопротивления на уровне 10^{-6} и ниже.

3. Анализ международных ключевых сличений серий K6 и K8 за период с 1999 по 2025 годы показывает устойчивое снижение расширенной неопределённости воспроизведения единицы температуры точки росы в средней части диапазона с 0,03 — 0,05 °C до 0,020 — 0,030 °C, расширение круга НМИ с сертифицированными СМС-строками до более чем 30 институтов и переход к региональным и двусторонним форматам сличений. Особое значение для настоящей работы имеет завершённое в 2025 году ключевое сличение COOMET.T-K6.1 с участием РГП «КазСтандарт» и ФГУП «ВНИИФТРИ», результаты которого рассматриваются в главе 3.

4. Подход MIKES, основанный на применении среднеобъёмного однопроходного насытителя (≈ 22 л) с ограничением объёмного расхода газа, представляет наибольший интерес как технико-экономически эффективная стратегия достижения конкурентоспособной неопределённости при существенно меньшей металлоёмкости конструкции. Дальнейшее развитие этого направления в виде значительного уменьшения объёма насытителя реализовано в настоящей работе: разработан насытитель малого объёма ≈ 4 л для диапазона воспроизведения от минус 50 °C до плюс 20 °C, конструкция которого защищена патентом Республики Казахстан на полезную модель KZ 9626 от 04.10.2024.

5. На основании проведённого анализа сформулированы следующие задачи диссертационного исследования: усовершенствовать Государственный эталон единицы

температуры точки росы/инея Республики Казахстан путём введения насытителя малого объёма и электрических измерительных каналов на базе эталонных платиновых термометров сопротивления с прецизионным термометрическим измерителем Fluke 1594A; экспериментально исследовать метрологические характеристики усовершенствованного эталона; разработать программную часть аппаратно-программного комплекса с автоматическим формированием бюджета неопределённости; подтвердить измерительные возможности эталона в международном ключевом сличении; актуализировать Государственную поверочную схему для средств измерений влажности газов в Республике Казахстан.

Основные результаты, представленные в разделе 1, опубликованы в работах [63–65].

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭТАЛОНА ТЕМПЕРАТУРЫ ТОЧКИ РОСЫ/ИНЕЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

2.1 Актуальность создания эталона

Для метрологического обеспечения средств измерений в диапазоне температуры точки росы/инея от минус 50 °С до 20 °С возникает объективная необходимость в создании первичного эталона.

Необходимость разработки первичного эталона исходить из того, что прослеживаемость рабочих эталонов влажности получают из зарубежных национальных метрологических институтов, так как государственные эталоны влажности не являются первичными эталонами и по точности находиться на том же уровне, что рабочие эталоны лаборатории.

Диапазон температуры точки росы/инея от минус 50°С до 20°С был выбран из результатов анализа технического регламента, межгосударственного и национального стандарта, распространяющегося на территории Республики Казахстан [66-72].

Таким образом, совершенствование обеспечения единства измерений температуры точки росы с требуемой точностью представляет собой актуальную и первоочередную задачу в данной области метрологии.

Для решения указанной задачи необходимы разработка и исследование Государственного первичного эталона единицы температуры точки росы/инея в интервале от минус 50 °С до 20 °С, создание методик калибровки, а также подготовка актуализированного проекта Государственной поверочной схемы для средств измерений влажности газов, включая единицы измерения объёмной (молярной) доли влаги.

2.2 Совершенствование государственного эталона единицы температуры точки росы/инея Республики Казахстан

2.2.1 Состав и описание эталонного комплекса

Совершенствуемый Государственный эталон единицы температуры точки росы/инея представляет собой измерительный комплекс, функционирующий на основе метода фазового равновесия, в соответствии с которым температура насытителя принимается численно равной температуре точки росы/инея газового потока на выходе из насытителя.

Средства измерений, входившие в состав существующего эталона, обеспечивали передачу единицы температуры точки росы/инея в диапазоне от минус 80 °С до плюс 20 °С с расширенной неопределённостью от 0,2 °С до 0,75 °С. В целях существенного снижения суммарной

неопределённости результатов измерений в состав модернизированного эталонного комплекса были введены новые средства измерений с улучшенными метрологическими характеристиками.

Обновлённый состав эталонного комплекса представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 — Технические средства, входящие в состав эталонного комплекса

Наименование	**Обозначение**	**Заводские номера**
Компрессорная станция	GBWA-062ABK 110/12	D030180
Сушилка с переменным давлением	PSD-2	143284
Генератор точки росы	DG-4	143531
Жидкостной термостат	Fluke 7380	A87409
Эталонный термометр сопротивления	ЭТС-100	11-72
Эталонный термометр сопротивления	ЭТС-100	08-191
Эталонный термометр сопротивления	Fluke 5699	1298
Прецизионный мост сопротивления	Fluke 1594A	B99396
Конденсационный гигрометр точки росы	S8000 RS	143381
Барометр	БОП-1М-2	0910368
Насытитель с теплообменником	-	б/н

Блок-схема аппаратно-программного комплекса воспроизведения влажности воздуха КазСтандарта представлены на рисунке 2.1.

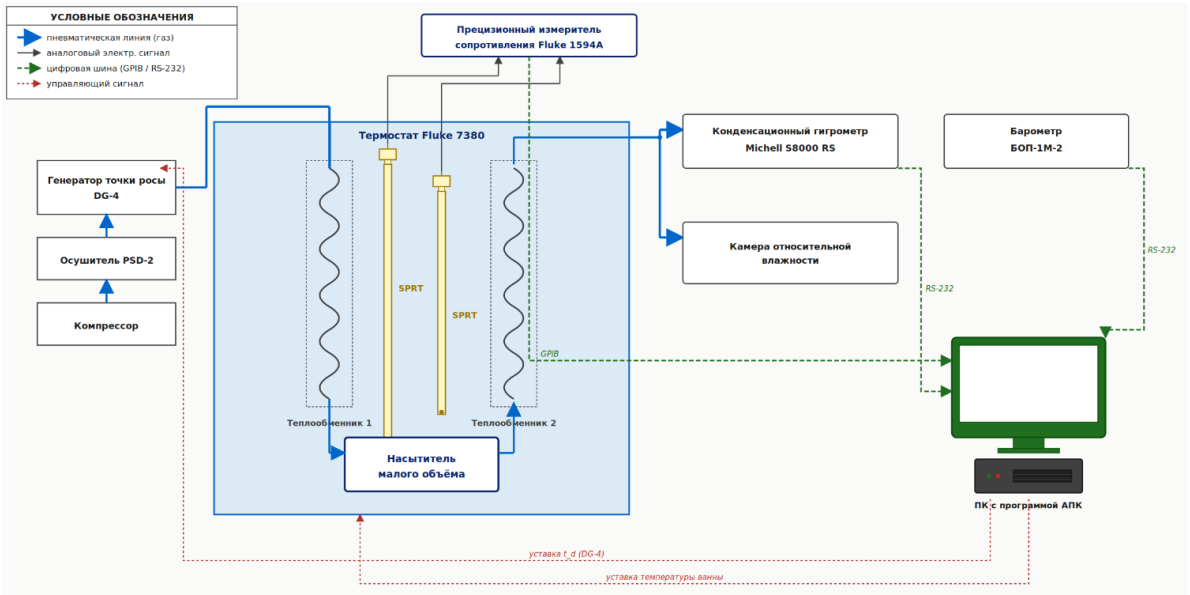


Рисунок 2.1 — Блок-схема аппаратно-программного комплекса воспроизведения влажности воздуха КазСтандарта

Компрессорная станция

Источник сжатого воздуха формируется посредствам компрессорной станций.

В основе источника сжатого воздуха лежит безмасляный поршневой компрессор марки Durr Technik с ресивером объёмом 10 л. Давление в системе поддерживается реле Condor MDR 3, настроенным на уставку 6 бар (0,6 МПа). На выходе компрессорного блока установлен дополнительный редукционный клапан M004-R00 производства Camozzi, обеспечивающий необходимый уровень давления на входе в осушитель. Для снижения температуры выходящего сжатого воздуха и отделения конденсата применяются теплообменник и циклонный сепаратор, смонтированные на линии между компрессорной станцией и осушителем

Класс чистоты сжатого воздуха соответствует ГОСТ Р ИСО 8573-1-2016:

0 – размер частиц не более 10 нм;

6 – влажность не более 10°С температуры точки росы;

2 – содержания масла не более 0,1мг/м^3 [74].

Сушилка с переменным давлением PSD-2

Сжатый воздух с давлением от 5,5 до 7 бар (от 0,55 до 0,7 МПа) поступает в сушилку, где электромагнитный клапан направляет его в одну из двух колонок с осушителем на 10 минут с давлением в колонке 0,48 МПа. Через 10 минут электромагнитный клапан переключается на другую колонну, и быстрое снижение давления в первом колонне приводит к испарению влаги с поверхности молекулярных сит. Сушильные колонны оснащены молекулярными ситами типа 4 Å с номинальными размерами от 2,38 мм до 4,76 мм. На передней панели расположены два манометра, которые показывают давление в каждой сушильной колонне.

Сушилка обеспечивает сухой воздух до минус 75°С температуры точки инея.

Внешний вид сушилки с переменным давлением PSD-2 показан на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 — Сушилка с переменным давлением PSD-2 [75]

Генератор точки росы DG-4

Генератор точки росы DG-4 воспроизводит заданное значение температуры точки росы путём смешения осушенного и увлажнённого газовых потоков. Дозирование компонентов смеси осуществляется набором клапанов с калиброванными проходными сечениями; требуемое соотношение потоков задаётся коммутацией соответствующих соленоидных клапанов. Источником осушенного газа служит адсорбционный осушитель с переменным давлением PSD-2. Увлажнение осуществляется барботажным способом через сатуратор с дистиллированной водой. Во избежание конденсации влаги в трубопроводах температура внутри корпуса генератора стабилизирована на уровне (35 ± 2) °C.

На лицевой панели генератора размещены кнопки управления для задания требуемого значения температуры точки росы/инея в диапазоне от минус 70 °C до плюс 20 °C с дискретностью 10 °C, а также кнопка активации режима полного осушения (Fulldry). Погрешность воспроизведения заданного значения температуры точки росы/инея составляет ±0,5 °C; стабильность поддержания температуры точки росы/инея находится в диапазоне от 0,2 °C до 2,0 °C.

Общий вид генератора точки росы DG-4 представлен на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 — Генератор точки росы DG-4 [76]

Насытитель с теплообменником

Центральным функциональным элементом системы воспроизведения единицы температуры точки росы/инея служит насытитель, посредством которого реализуется метод фазового равновесия.

Увлажнённый воздух от генератора точки росы DG-4 поступает во внешний теплообменник; объёмный расход воздуха регулируется игольчатым клапаном, конструктивно интегрированным в генератор, и не превышает 1 л/мин. В теплообменнике поступающий увлажнённый воздух приводится к температуре термостата посредством охлаждения или нагрева, после чего направляется в насытитель. В рабочей полости насытителя газовый поток проходит над поверхностью воды или льда, обеспечивая полноту фазового насыщения.

Насытитель выполнен в виде горизонтально ориентированного сосуда овального поперечного сечения с шириной 15 мм, высотой 30 мм и длиной 200 мм. Указанные геометрические параметры обеспечивают необходимую протяжённость контактной зоны газового потока с поверхностью воды или льда. Рабочий объём дистиллированной воды в насытителе составляет 15 мл, что соответствует приблизительно половине внутреннего объёма сосуда. На выходном участке насытителя установлен тройник, к которому подключены внутренний теплообменник, гнездо для эталонного термометра сопротивления и выходной патрубок насытителя.

Гнездо для эталонного термометра сопротивления образовано тремя последовательно соединёнными трубками из нержавеющей стали с внутренним диаметром 6 мм и наружным диаметром 8 мм. Трубки имеют различную длину — 30, 50 и 150 мм — и соединяются между собой резьбовыми муфтами с уплотнителями, имеющими внутренний диаметр 8 мм и наружный диаметр 10 мм. Данная конструкция обеспечивает измерение температуры непосредственно в газовом потоке и допускает применение эталонных термометров сопротивления с наружным диаметром не более 5 мм.

Внутренний теплообменник соединён с гигрометром точки росы. Оба теплообменника изготовлены из коррозионностойкой стали: внутренняя трубка имеет диаметр 4 мм, внешняя — 6 мм; суммарная длина трубки теплообменника составляет 2,95 м. Насытитель в сборе с теплообменниками размещён в жидкостном термостате Fluke 7380 с объёмом рабочей ванны 4 л.

Конструкция насытителя с теплообменником представлена на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 — Насытитель с теплообменником [77]

Жидкостной термостат Fluke 7380

Ключевыми метрологическими характеристиками жидкостного термостата в составе первичного эталона температуры точки росы/инея являются точность установки и долгосрочная стабильность поддержания заданной температуры. Именно эти параметры в решающей мере определяют суммарную неопределённость воспроизведения единицы. В состав эталонного комплекса включён жидкостный термостат Fluke 7380 с рабочим диапазоном от минус 80 °C до плюс 20 °C.

Внешний вид жидкостного термостата представлен на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 — Жидкостной термостат Fluke 7380 [78]

Ванна термостата представляет собой резервуар объёмом 4 л из коррозионностойкой стали, заполненный теплоносителем на основе технического спирта. Принудительное перемешивание теплоносителя осуществляется посредством встроенной мешалки, обеспечивающей стабильность и пространственную однородность температуры в рабочем объёме ванны с отклонением не более 0,01 °C.

Размер окна рабочей камеры ванны термостата составляет 86×114 мм, глубина 178 мм.

В качестве крышкой ванны используется несшитый изолон.

Эталонные термометры сопротивления

Эталонный термометр сопротивления ЭТС-100, выпускаемый ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (Россия) [79], и эталонный платиновый термометр сопротивления Fluke 5699, производства компании Fluke Corporation (США) [80], являются рабочими эталонами единицы температуры третьего и второго разряда соответственно в соответствии с ГОСТ 8.558-2009 «Государственная поверочная схема для средств измерений температуры» [81].

Оба термометра функционируют на основе физического принципа зависимости электрического сопротивления платины от температуры. Первичный преобразователь каждого прибора представляет собой спиральный резистивный элемент из платиновой проволоки с параметром температурного коэффициента сопротивления $W100 \geq 1{,}3850$.

Эталонный термометр сопротивления ЭТС-100 вставляется во вставку для термометра и измеряет прямую температуру влажного газа внутри насытителя. Эталонный платиновый термометр сопротивления Fluke 5699 измеряет температуру жидкостного термостата.

Общий вид эталонного платинового термометра сопротивления представлены на рисунках 2.6-2.7.



Рисунок 2.6 — Эталонный термометр сопротивления ЭТС-100



Рисунок 2.7 — Эталонный платиновый термометр сопротивления Fluke 5699

Основные метрологические и технические характеристики термометров сопротивления приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 — Основные метрологические и технические характеристики эталонных термометров сопротивления

Характеристики	ЭТС-100, зав. №11-72	ЭТС-100, зав. №08-191	Fluke 5699, зав. №1298
Диапазон измерения температуры, ℃	от 0,01 до 419,527	от -196 до 0,01	от -196 до 660,323
Разряд	3	3	2
Номинальное сопротивление при 0 ℃, Ом	100	100	25
Пределы допускаемой доверительной абсолютной погрешности при доверительной вероятности 0,95, ℃, при температуре:			
-196℃		±0,05	±0,03
-38,8344 ℃			±0,014
0,01℃	±0,02	±0,02	±0,01
29,7646 ℃	±0,02		±0,01
156,5986℃	±0,04		±0,02
231,928℃	±0,04		±0,02
419,527℃	±0,07		±0,02
660,323℃			±0,03
Внешний диаметр защитной трубки, мм	5,0	5,0	6,0
Длина погружаемой части термометра, мм	500	500	482

Прецизионный мост сопротивления Fluke 1594A

Прецизионный мост сопротивления Fluke 1594A предназначен для регистрации сигналов электрического сопротивления, поступающих от эталонных термометров сопротивления, и их последующего преобразования в значения температуры на основании индивидуальных градуировочных характеристик.

Общий вид прецизионного моста сопротивления Fluke 1594A представлен на рисунке 2.8.



Рисунок 2.8 – Прецизионный мост сопротивления Fluke 1594A [83]

Основные метрологические и технические характеристики прецизионного моста сопротивления представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Основные метрологические и технические характеристики прецизионного моста сопротивления

Номинальное сопротивление	Измерительный ток	Диапазон измерения сопротивления, Rx	Пределы допускаемой абсолютной погрешности, Ом
1 Ом	10 мА	от 0 до 1,2 Ом	$\pm 5\times10^{-5}\times Rx$
10 Ом	3 мА	от 0 до 12 Ом	$\pm 1{,}3\times10^{-5}\times Rx$
25 Ом	1 мА	от 0 до 120 Ом	$\pm 0{,}63\times10^{-5}\times$ Rx
100 Ом	1 мА	от 0 до 400 Ом	$\pm 0{,}5\times10^{-5}\times Rx$

Конденсационный гигрометр точки росы S8000 RS

Рабочий принцип гигрометра S8000 RS основан на конденсационном методе измерения температуры точки росы. Метод заключается в поиске температуры охлаждаемого зеркала, при которой на его поверхности устанавливается динамическое равновесие между скоростями конденсации и испарения водяного пара, что внешне проявляется как стабилизация толщины конденсированного слоя.

Конденсационный гигрометр точки росы S8000 RS используется в составе эталонного комплекса в качестве контрольного гигрометра для определения выхода на режим стабильности и в качестве гигрометра-компаратора для калибровки генераторов влажного газа.

Общий вид конденсационного гигрометра точки росы S8000 RS представлен на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 — Конденсационный гигрометр точки росы S8000 RS [84]

Основные метрологические и технические характеристики гигрометра представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Основные метрологические и технические характеристики гигрометра

Наименование характеристики	Значение характеристики
Диапазон измерения температуры точки росы/инея	от минус 90°С до 20°С
Предел допускаемой абсолютной погрешности температуры точки росы/инея	±0,2°С
Диапазон измерения скорости потока	От 0 до 1000 мл/мин
Предел допускаемой приведенной погрешности скорости потока	±1,5%
Скорость образца потока	От 500 до 1000 мл/мин (рекомендуется 750 мл/мин)
Максимальная давления образца газа	1 МПа
Соединение образца газа	Вход: ¼" VCR Выход: ¼" Swagelok

Барометр БОП-1М-2

Принцип действия барометра БОП-1М-2 основан на зависимости собственной частоты резонанса тонкостенного цилиндрического чувствительного элемента от приложенного давления. При изменении давления механическая деформация цилиндра вызывает пропорциональный сдвиг частоты, которая фиксируется автогенераторной схемой. Для

компенсации температурной зависимости частоты в корпус прибора интегрирован встроенный датчик температуры.

Значение абсолютного давления необходимо для преобразования единицы измерения температуры точки росы/инея в объемную долю влаги.

Общий вид барометра БОП-1М-2 представлен на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10 — Барометр БОП-1М-2 [85]

Основные метрологические и технические характеристики барометра приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Основные метрологические и технические характеристики барометра

Наименование характеристики	Значение характеристики
Диапазон измерения абсолютного давления	от 5 гПа до 1100 гПа
Предел допускаемой абсолютной погрешности абсолютного давления	±10 Па

2.2.2 Исследование метрологических характеристик усовершенствованного эталонного комплекса

Генератор влажности включает насытитель, через который пропускается очищенный воздух, насыщаемый водяным паром в результате установления термодинамического и фазового равновесия с плоской поверхностью воды или льда. Насыщенный газ характеризуется молярной (объёмной) долей водяного пара x, которая остаётся неизменной при изменениях температуры и давления, претерпеваемых влажным газом на участке от выхода из насытителя до точки измерения.

Молярная доля влаги (объемная доли влаги) x определяется как отношение количества (объёма) водяного пара n_w к суммарному количеству (объёму) всех компонентов газовой смеси n_w+n_d:

$$x = \frac{n_w}{n_w + n_d} \tag{2.1}$$

где n_w — количество молей водяного пара, моль; n_d — количество молей сухого газа, моль.

Согласно закону Дальтона, парциальное давление водяного пара в газовой смеси определяется как произведение молярной доли водяного пара на суммарное давление p газовой

смеси. Поскольку данный закон справедлив лишь в приближении идеального газа, для описания реальных газовых смесей вводится поправочный коэффициент усиления давления насыщенного пара *f*, учитывающий отклонение поведения реального газа от идеального:

$$f(t,P)\times e(t) = x\times P \tag{2.2}$$

где $f(t,P)$ – коэффициент эффективности давления водяного пара, оцененный при температуре t и давления P газа, а $e(t)$ – давление насыщенного пара чистой фазы воды или льда, оцененное при температуре t.

Для генератора влажности с одним насытителем объемная (молярная) доля влаги температуры точки росы x_d равна к объемной (молярной) доле влаги температуры насыщения x_s и значение температуры точки росы t_d определяется путем решения следующего уравнения:

$$\frac{f\left(t_d,P_d\right)\times e\left(t_d\right)}{P_d} = \frac{f\left(t_s,P_s\right)\times e\left(t_s\right)}{P_s} \tag{2.3}$$

где t_s – температура насыщения, P_s и P_d – давления насыщения и образования точки росы, соответственно.

Воспроизведение влажности методом фазового равновесия, при котором перепад давления приблизительно отсутствует, то есть $P_s \approx P_d$, что приводит к равенству точки росы $t_d \approx t_s$.

Значение давление водяного пара зависит от значений температуры точки росы, что можно заметить в работах Wexler [86] и после утверждения ITS-90 были обновлены Sonntag [87], Hardy [61] и Huang [88]. Ниже представлены формулы (2.4) и (2.5) и коэффициенты Hardy в таблице 2.6.

Над водой: $$e_s = exp\left(\sum_{i=0}^{6} g_i T^{i-2} + g_7 lnT\right) \tag{2.4}$$

Надо льдом: $$e_s = exp\left(\sum_{i=0}^{4} k_i T^{i-1} + k_5 lnT\right) \tag{2.5}$$

где T – температура водяного пара, выраженная в Кельвинах.

Таблица 2.6 – Значения коэффициентов Hardy

Коэффициент	**Над водой**	**Коэффициент**	**Надо льдом**
g_0	$-2{,}8365744\times10^{3}$	k_0	$-5{,}8666426\times10^{3}$
g_1	$-6{,}028076559\times10^{3}$	k_1	$2{,}232870244\times10^{1}$
g_2	$1{,}954263612\times10^{1}$	k_2	$1{,}39387003\times10^{-2}$
g_3	$-2{,}737830188\times10^{-2}$	k_3	$-3{,}4262402\times10^{-5}$
g_4	$1{,}6261698\times10^{-5}$	k_4	$2{,}7040955\times10^{-8}$

Продолжение таблицы 2.6

Коэффициент	Над водой	Коэффициент	Надо льдом
g_5	$7{,}0229056\times10^{-10}$	k_5	$6{,}7063522\times10^{-1}$
g_6	$-1{,}8680009\times10^{-13}$	–	–
g_7	2,7150305	–	–

Относительная стандартная неопределенность вычислений значения давления водяного пара $u_r(e)$ составляет: $u_r(e)<0{,}005\%$ в интервале температуры $0°C \le t \le 100°C$, $u_r(e)<(0{,}01-0{,}005\times t)$ % в интервале температуры $-100°C \le t \le 0{,}01°C$ [89].

Формулы для определения эффективности давления водяного пара приведены в работах Hyland [90] и Greenspan [91], и представляет следующие выражения (2.6–2.8):

$$f(t,P)=exp\left[\alpha(t)\left(1-\frac{e(t)}{P}\right)+\beta(t)\left(\frac{P}{e(t)}-1\right)\right] \tag{2.6}$$

$$\alpha(t)=\sum_{i=0}^{3}A_i t^i \tag{2.7}$$

$$\beta(t)=\exp\left[\sum_{i=0}^{3}B_i t^i\right] \tag{2.8}$$

Коэффициенты для определения коэффициента эффективности водяного пара для влажного воздуха представлены в таблице 2.7 [61].

Таблица 2.7 – Значения коэффициентов Hardy для определения коэффициента эффективности водяного пара для влажного воздуха

	–100 °C < *t* < 0 °C (лед)	–50 °C < *t* < 0 °C (вода)	0 °C < *t* < 100 °C (вода)
A_0	$3{,}64449\times10^{-4}$	$3{,}62183\times10^{-4}$	$3{,}53624\times10^{-4}$
A_1	$2{,}9367585\times10^{-5}$	$2{,}6061244\times10^{-5}$	$2{,}9328363\times10^{-5}$
A_2	$4{,}8874766\times10^{-7}$	$3{,}8667770\times10^{-7}$	$2{,}6168979\times10^{-7}$
A_3	$4{,}3669918\times10^{-9}$	$3{,}8268958\times10^{-9}$	$8{,}5813609\times10^{-9}$
B_0	$-1{,}07271\times10^{1}$	$-1{,}07604\times10^{1}$	$-1{,}07588\times10^{1}$
B_1	$7{,}6215115\times10^{-2}$	$6{,}3987441\times10^{-2}$	$6{,}3268134\times10^{-2}$
B_2	$-1{,}7490155\times10^{-4}$	$-2{,}6351566\times10^{-4}$	$-2{,}5368934\times10^{-4}$
B_3	$2{,}4668279\times10^{-6}$	$1{,}6725084\times10^{-6}$	$6{,}3405286\times10^{-7}$

Относительная стандартная неопределенность $u_r(f)$ коэффициента эффективности водяного пара для влажного воздуха представлен в (2.9) [92]:

$$u_r(f) \le \left(1,68\times10^{-9}P - 10^{-5}\right)\times exp\left[\left(2,2\times10^{-5}ln(P) - 0,0139\right)\times t\right] \quad (2.9)$$

где t – температура водяного пара, находящегося в диапазоне от минус 90 °С до 100 °С; P – давления водяного пара, находящегося диапазоне от 5×10^4 Па до 2×10^6 Па.

Неопределённость измерений температуры точки росы/инея

Количественная оценка неопределённости измерений температуры точки росы/инея, воспроизводимой усовершенствованным эталонным комплексом, выполнена в строгом соответствии с методологической базой, регламентированной ГОСТ 34100.3 «Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения» [93].

На основе реализации метода фазового равновесия температура точки росы/инея приравнивается к температуре насытителя, что способствует определения единицы прямым методом измерений. Модель уравнения представляет с собой следующим образом:

$$\begin{aligned} T_d = \overline{T_s} + \delta T_{cal_SPRT} + \delta T_{dr_SPRT} + \delta T_{hys_SPRT} + \delta T_{heat_SPRT} + \delta T_{cal_br} + \delta T_{res_br} + \\ + \delta T_{dr_br} + \delta T_{inho_bath} + \delta T_{inst_bath} + \delta T_{eff_sat} \end{aligned} \quad (2.10)$$

где T_d – значение температуры точки росы/инея;

$\overline{T_s}$ – среднее значение температуры насытителя;

δT_{cal_SPRT} – поправка, обусловленная калибровкой эталонного термометра сопротивления;

δT_{dr_SPRT} – поправка, обусловленная дрейфом эталонного термометра сопротивления;

δT_{hys_SPRT} – поправка, обусловленная гистерезисом эталонного термометра сопротивления;

δT_{heat_SPRT} – поправка, обусловленная самонагревом эталонного термометра сопротивления;

δT_{cal_br} – поправка, обусловленная калибровкой термометрического моста;

δT_{res_br} – поправка, обусловленная ценой деления термометрического моста;

δT_{dr_br} – поправка, обусловленная дрейфой термометрического моста;

δT_{inho_bath} – поправка, обусловленная неоднородности ванны термостата;

δT_{inst_bath} – поправка, обусловленная нестабильности ванны термостата;

δT_{eff_sat} – поправка, обусловленная эффективности насытителя.

Неопределенность измерений температуры

Метрологическая прослеживаемость эталонного термометра сопротивления обеспечивается в соответствии с Международной температурной шкалой МТШ-90 путём калибровки по реперным точкам. Рабочий диапазон эталона — от минус 50 °С до плюс 20 °С — охватывается реперными точками тройной точки ртути, тройной точки воды и точки плавления галлия [94].

Стандартная неопределенность калиброванного эталонного термометра сопротивления определяется как расширенная неопределенность, деленная на значение коэффициента охвата, указанное в сертификатах калибровки для этого термометра.

$$u(\delta T_{cal_SPRT}) = \frac{U_{SPRT}}{k} \tag{2.11}$$

Дрейф эталонного термометра сопротивления характеризует изменение его показаний за период с момента предыдущей калибровки и численно выражается максимальным расхождением между значениями, полученными до калибровки (T1) и по её завершении (T2) [95].

Стандартная неопределенность дрейфа эталонного термометра сопротивления представляет собой прямоугольное распределение:

$$u(\delta T_{dr_SPRT}) = \frac{T_2 - T_1}{\sqrt{3}} \tag{2.12}$$

Гистерезис термометра сопротивления обусловлен взаимосвязью между температурой и сопротивлением платины и определяется конструктивными особенностями чувствительного элемента. Механические напряжения, возникающие вследствие неодинакового теплового расширения материалов, приводят к нарушению воспроизводимости показаний [96]. Величина гистерезиса оценивается при температуре тройной точки воды в ходе калибровки.

Стандартная неопределенность гистерезиса эталонного термометра сопротивления представляет собой прямоугольное распределение:

$$u(\delta T_{hys_SPRT}) = \frac{(R_{\max} - R_{\min}) \times C_R}{\sqrt{3}} \tag{2.13}$$

где C_R – коэффициент чувствительности сопротивления к температуре, °С/Ом.

Для измерения электрического сопротивления через термометр пропускается электрический ток. Рассеиваемая при этом тепловая мощность нагревает чувствительный элемент, что приводит к систематическому завышению регистрируемой температуры относительно истинного значения. Указанная погрешность обусловлена эффектом джоулева самонагрева чувствительного элемента [97, 98].

$$R_0 = 2R_1 - R_2 \tag{2.14}$$

где R_0 — сопротивление термометра при отсутствии тока, Ом; R_1 и R_2 — сопротивления термометра при силе тока 1 мА и $\sqrt{2}$ мА соответственно, Ом.

Стандартная неопределенность самонагрева эталонного термометра сопротивления представляет собой прямоугольное распределение:

$$u(\delta T_{heat_SPRT}) = \frac{(R_1 - R_0) \times C_R}{\sqrt{3}} \tag{2.15}$$

Прослеживаемость измерений электрического сопротивления термометрического моста обеспечивается посредством передачи единицы от государственного первичного эталона на основе квантового эффекта Холла (регистрационный номер KZ.01.01.00053-2010) к катушкам сопротивления с номинальными значениями 1, 10, 100, 1000 и 10 000 Ом.

Стандартная неопределенность калиброванного термометрического моста определяется как расширенная неопределенность, деленная на значение коэффициента охвата, указанное в сертификатах калибровки для этого моста.

$$u(\delta T_{cal_br}) = \frac{U_{br}}{k} \tag{2.16}$$

Источник неопределенности от цены деления измерительного оборудования являются основным источником неопределенности измерений, так как возможность отображения показаний завышает или занижает результат измерений [101]. Для оценки стандартной неопределенности учитывается половина значений цены деления и предполагая прямоугольное распределение:

$$u(\delta T_{res_br}) = \frac{d_{br}}{2\sqrt{3}} \tag{2.17}$$

Дрейф термометрического моста описывает его смещения с момента последней повторной калибровки, то есть максимальное отклонение между значениями до калибровки R_1 и после калибровки R_2 [102].

Стандартная неопределенность дрейфа термометрического моста представляет собой прямоугольное распределение:

$$u(\delta T_{dr_br}) = \frac{R_2 - R_1}{\sqrt{3}} \tag{2.18}$$

Неопределенность поддержаний температуры ванны

Составляющая поправки температуры в жидкостном термостате, обусловленная осевой и радиальной неоднородностью теплового поля в рабочем объёме, оценивается как наибольшее отклонение фактической температуры от значения в контрольной точке

Стандартная неопределенность неоднородности температуры ванны представляет собой прямоугольное распределение:

$$u(\delta T_{inho_bath}) = \frac{\Delta T_{inho}}{\sqrt{3}} \tag{2.19}$$

Поправка, учитывающая временну́ю нестабильность температуры жидкостного термостата в рабочем объёме, определяется как разность максимального и минимального значений температуры, зафиксированных в контрольной точке за время измерения

Стандартная неопределенность нестабильности температуры ванны представляет собой прямоугольное распределение:

$$u(\delta T_{inst_bath}) = \frac{\Delta T_{inst}}{\sqrt{3}} \tag{2.20}$$

Неопределенность эффективности насытителя

На основе проведённых экспериментов выполнена оценка составляющей неопределённости, обусловленной неполным насыщением газа в насытителе. Для корректного функционирования насытителя при заданном расходе — достаточном для одновременного подключения хотя бы одного поверяемого гигрометра — он должен выравнивать температуру точки росы входящего и выходящего газовых потоков. На практике это означает, что входящий газ должен насыщаться в насытителе (если его точка росы ниже температуры насытителя) или отдавать избыточную влагу в виде конденсата (если точка росы выше). Эффективность насытителя изучалась путём непрерывного мониторинга с помощью высокоточного конденсационного гигрометра с охлаждаемым зеркалом при варьировании расхода входного газа и его точки росы; расход через поверяемые гигрометры при этом сохранялся постоянным.

Степень насыщения определяется двумя ключевыми параметрами: температурой точки росы поступающего газа и его объёмным расходом. В большинстве случаев точка росы входного газа превышает температуру насытителя не более чем на 5–10 °C, что обеспечивает достаточно высокую скорость достижения равновесного насыщения. Расход газа через насытитель необходимо выбирать с учётом требований к стабильной работе конденсационного гигрометра [105–108].

Эффективность насытителя определяется экспериментально: в первом случае используется откалиброванный конденсационный гигрометр, а во втором - межлабораторное сравнение, где отклонение от контрольного значения будет приниматься за значение эффективности насытителя.

Стандартная неопределенность эффективности насытителя представляет собой прямоугольное распределение:

$$u(\delta T_{eff_sat}) = \frac{\Delta T_{eff}}{\sqrt{3}} \quad (2.21)$$

2.2.3 Компьютерное моделирование насытителя с теплообменником

Насытитель представляет собой ключевой функциональный элемент усовершенствованного государственного эталона, в котором осуществляется полное фазовое насыщение газа. Эффективность насыщения возрастает с увеличением внутреннего объёма сатуратора и длины пути контакта газа с поверхностью воды или льда; при этом доступный объём насытителя ограничен габаритами термостатирующей ванны.

Для воспроизведения температуры точки росы/инея в диапазоне от минус 50 °С до плюс 20 °С с учётом технических возможностей РГП «КазСтандарт» был выбран жидкостной термостат Fluke 7380 с диапазоном воспроизведения температуры от минус 80 °С до плюс 100 °С и объёмом ванны 4 л.

С учётом геометрических параметров ванны термостата сформирована конструктивная модель насытителя в сборе с теплообменниками (рисунок 2.11). На стадии предварительного проектирования в среде программного комплекса COMSOL Multiphysics разработаны компьютерные модели насытителя, обеспечивающие возможность комплексного исследования термодинамических и гидродинамических процессов в его рабочей полости. Численное моделирование позволило установить следующие характеристики исследуемой системы: ориентировочное время достижения стационарного теплового режима, величину температурного перепада между жидкостной ванной и насытителем, характер пространственного распределения температуры по объёму насытителя, а также степень эффективности насыщения газового потока. Результаты выполненного численного моделирования приведены на рисунках 2.12, 2.13 и 2.14.

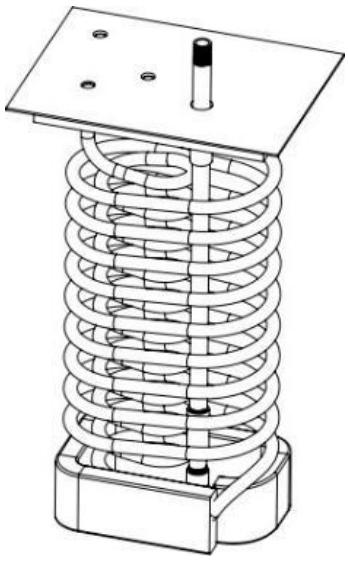


Рисунок 2.11 — Чертёж насытителя с теплообменником [77]

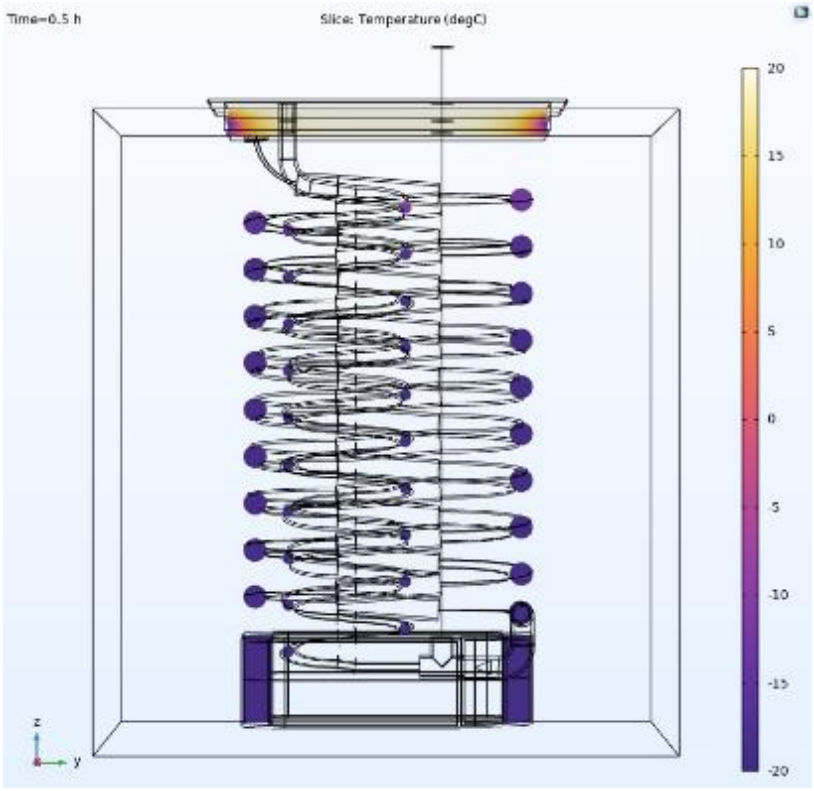


Рисунок 2.12 — Распределение температуры в зависимости от конструкции насытителя при температуре ванны −20 °C в течение 30 минут работы

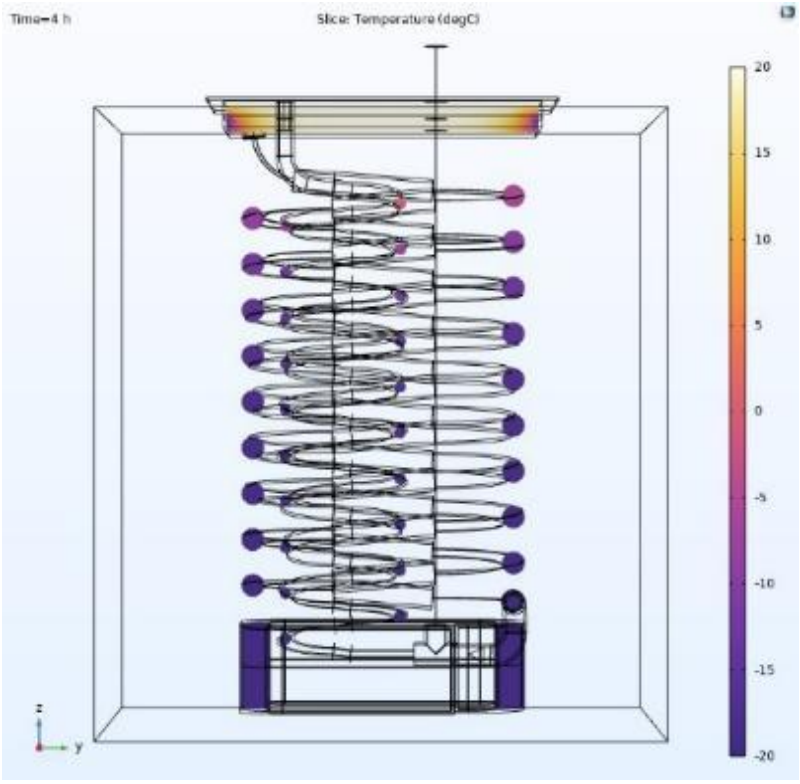


Рисунок 2.13 — Распределение температуры в зависимости от конструкции насытителя при температуре ванны −20 °C в течение 4 часов работы

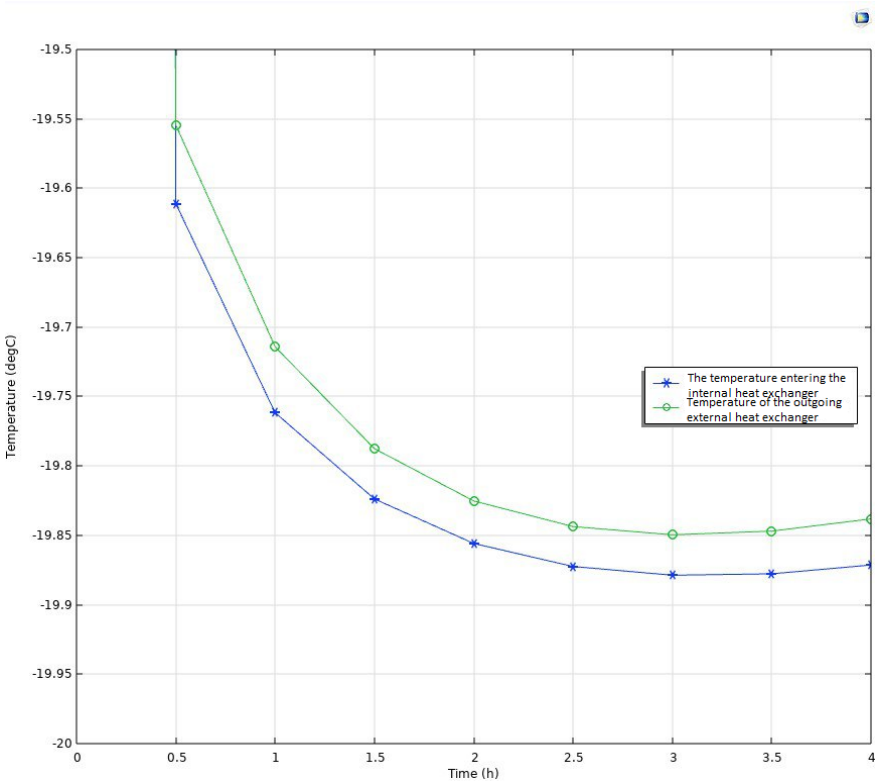


Рисунок 2.14 — Стабилизация температуры точки росы (синяя линия – температура входа внутреннего теплообменника, зеленая линия – температура выхода внешнего теплообменника)

Исходя из результатов компьютерного моделирования, приведённых на рисунках 2.12 и 2.13, с момента начала подачи влажного воздуха от генератора точки росы DG-4, где температура подаваемого влажного воздуха составляет 35 °C, за 4 часа работы прогреваются только три ступени — внешний и внутренний теплообменники. Приблизительная максимальная температура нагрева внешнего теплообменника составляла минус 5 °C, а внутреннего — плюс 10 °C.

Исходя из графика 1, можно сделать вывод, что температура влажного воздуха, поступающего из внешнего теплообменника и проходящего над поверхностью льда/воды в насытителе дополнительно снижается, что подтверждается результатами измерения температуры внутреннего теплообменника на 0,025 °C. И эта разница сохраняется в течение всего периода времени.

2.2.4 Экспериментальные исследования усовершенствованного государственного эталона

Воспроизведение единицы температуры точки росы/инея на усовершенствованном государственном эталоне осуществлялось в следующем порядке:

• при воспроизведении положительных значений температуры точки росы газовый поток от генератора точки росы DG-4 подавался в насытитель с температурой точки росы в диапазоне от минус 20 °С до минус 10 °С;

• при воспроизведении отрицательных значений температуры точки росы газовый поток от генератора точки росы DG-4 подавался в насытитель, температура которого была установлена на 5 °С выше заданного значения температуры жидкостного термостата.

Время выхода на стационарный режим измерений составляло: при отрицательных значениях температуры точки росы — около 4 часов; при положительных значениях температуры точки росы — от 20 до 30 минут. На рисунке 2.15 и 2.16 представлены зависимости, иллюстрирующие переходные процессы при выходе на режим измерений при температуре точки росы минус 18 °С и плюс 18 °С соответственно. В приведённых графиках обозначение *t*(СМН) соответствует температуре точки росы/инея, измеренной конденсационным гигрометром, а *t*(SPRT) — температуре насытителя, измеренной эталонным платиновым термометром сопротивления.

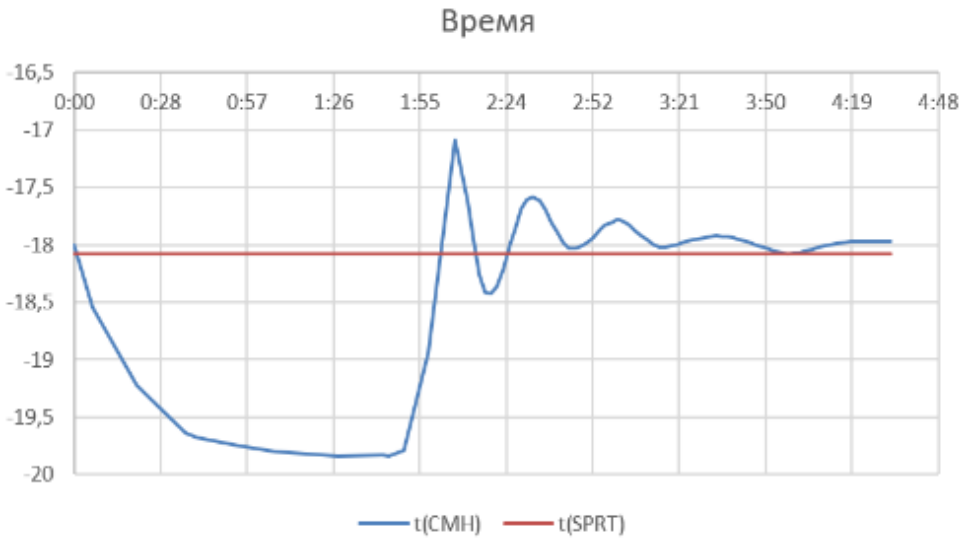


Рисунок 2.15 —Выход на режим температуры точки росы минус 18°С

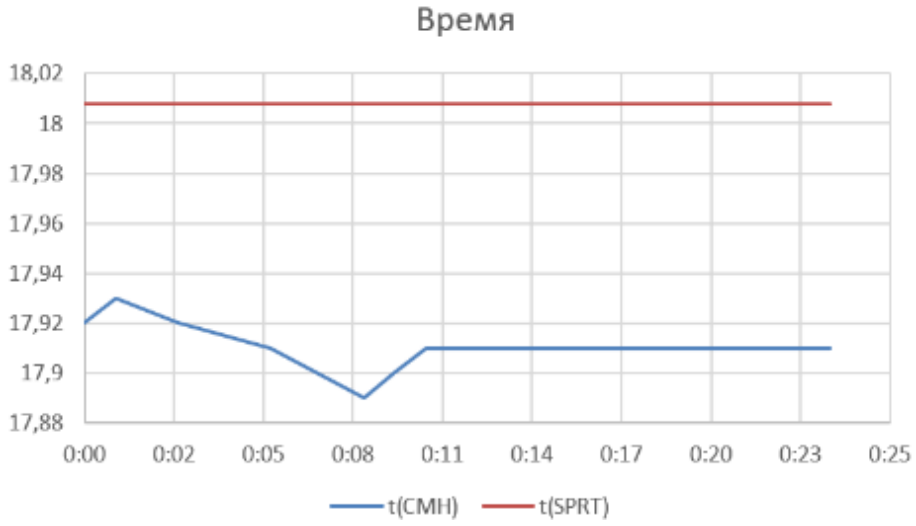


Рисунок 2.16 — Выход на режим температуры точки росы 18°C

При воспроизведении отрицательных значений температуры точки росы/инея в начале работы прослеживается характерная закономерность: на протяжении первых примерно двух часов показания конденсационных гигрометров снижаются более чем на 1,5 °C, после чего постепенно стабилизируются на заданном уровне. Данный эффект связан с тем, что в начальный период конденсация влаги на стенках теплообменника и насытителя существенно снижает влагосодержание газа; по мере формирования устойчивого увлажнённого тракта по всей длине газового пути показания гигрометров выходят на стационарный режим.

Результаты компьютерного моделирования в части определения времени стабилизации подтверждены экспериментальными данными.

При функционировании генератора на основе метода фазового равновесия, предполагающего насыщение газа над поверхностью воды или льда при постоянном давлении в насытителе, эффективность насыщения определяется протяжённостью газового пути над поверхностью конденсированной фазы, которая прямо пропорциональна внутреннему объёму насытителя.

В настоящем исследовании применялась жидкостная ванна объёмом 4 л, для которой был спроектирован и изготовлен насытитель объёмом 90 мл с длиной газового тракта над поверхностью воды или льда 200 мм.

Для сравнения следует отметить, что ряд зарубежных национальных метрологических институтов применяют насытители в ваннах значительно большего объёма. В частности, TUBITAK UME (Турция) использует ванну объёмом 16 л при максимальной расширенной неопределённости генератора ±0,08 °C (при минус 60 °C) [109]; MIKES (Финляндия) — 22 л при ±0,116 °C (при минус 90 °C) [110]; LPM (Хорватия) — 30 л при ±0,074 °C (при минус 70 °C) [13]; MIRS/FE-LMK (Словения) — 60 л при ±0,046 °C (при минус 50 °C) [14]; MBW Calibration AG

(Швейцария) — 27 л при ±0,05 °C (при минус 60 °C) [111]; генератор с ванной объёмом 167 л обеспечивает неопределённость ±0,008 °C (при минус 70 °C) [30].

Сравнительная таблица параметров насытителя, теплообменника и объема ванны термостатов национальных метрологических институтов представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Сравнительная таблица параметров насытителя, теплообменника и объема ванны

№	НМИ	Объем ванны	Длина теплообменника (диаметр)	Параметры насытителя
1	КазСтандарт (Казахстан)	4 л	2,95 м (4 мм)	30×15×200 мм
2	TUBITAK UME (Турция)	16 л	5,5 м (10 мм)	-
3	MIKES (Финляндия)	22 л	(12 мм)	-
4	LPM (Хорватия)	30 л	-	80×40×110 мм
5	MIRS/FE-LMK (Словения)	60 л	(12,7 мм)	Диаметр 150 мм, глубина 50 мм
6	MBW Calibration AG (Швейцария)	27 л	-	Канал одного блока: 10×8×755 мм. Общая длина 3,775 м
7	NIST (США)	167 л	116 параллельных трубок: 485 мм (7,8 мм)	Площадь поверхности воды 0,28 $см^2$

Сравнительная графическая иллюстрация представлена на рисунке 2.17, где показана зависимость неопределённости генератора от объёма ванны насытителя, что подтверждает: чем больше объём ванны и, соответственно, объём насытителя, тем меньше неопределённость.

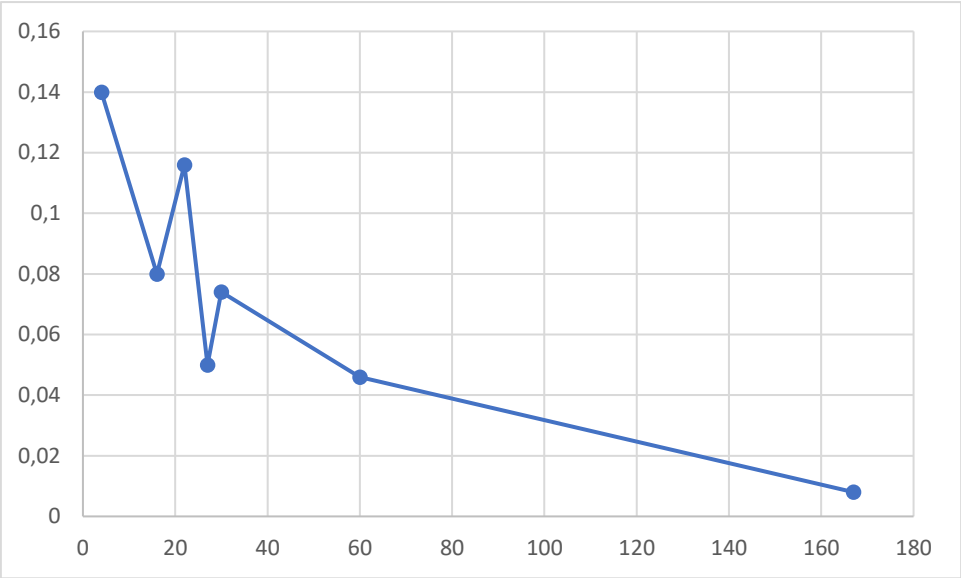


Рисунок 2.17 — Зависимость погрешности генератора (вертикальная ось) от объёма ванны насытителя (горизонтальная ось)

Исследование однородности ванны термостата

Исследование однородности ванны термостата было проведено для того, чтобы определить распределение температуры по насытитель и учесть источники неопределенности измерения температуры. Измерение проводилось в трех точках ванны, разделенных на глубине ванны: 5 см, 10 см, 18 см. Результаты измерения однородности температуры ванны термостата представлены в таблице 2.9.

Таблица 2.9 – Результаты однородности ванны термостата

№	Глубина ванны	Среднее значение температуры при 20℃	Среднее значение температуры при 0℃	Среднее значение температуры при минус 50℃
1	5 см	19,967 ℃	0,006 ℃	-49,947 ℃
2	10 см	19,965 ℃	-0,002 ℃	-49,962 ℃
3	18 см	19,963 ℃	0,003 ℃	-49,955 ℃
Размах		0,004 ℃	0,008 ℃	0,015 ℃

Размах значений однородности температуры ванны не превышает значения 0,02 °С, регламентированного технической документацией. При оценивании неопределённости данная величина принимается равной 0,012 °С с допущением прямоугольного закона распределения.

Исследование разницы температур ванны и насытителя

Эталонный термометр сопротивления ЭТС-100 вставляется вставку насытителя и находится в насытителе позволяющий измерять непосредственно температуру влажного воздуха из выхода насытителя. При выходе из основного блока насытителя воздух входит в тройник, к которому подключены вставка термометра и теплообменник. Вставка термометра состоит из трех трубок с внутренним диаметром 6 мм и наружным диаметром 8 мм. Трубки имеют различную длину –30 мм, 50 мм и 150 мм. Друг к другу трубки соединяются с помощью соединителя с резьбой и уплотнителем. Соединитель имеет внутренний диаметр 8 мм и наружный диаметр 10 мм. Такая конструкция позволит точнее измерять непосредственно температуру потока газа, а также использовать эталонный термометр сопротивления с внешним диаметром не более 5 мм.

Вход в трубку вставки термометра герметизирован уплотнителем для герметизации и закрывания зазора между термометром и трубкой вставки термометра. К тройнику сперва подключается трубка длиной 30 мм, далее подключается трубка длиной 150 мм и после – трубка длиной 50 мм. Последовательность подключения трубок вставки термометра выбрано для минимизации риска массопереноса тепла и водяного пара между основным блоком насытителя и окружающей средой. При установлении термометра сопротивления и подключении всех соединителей, уплотнители закрывают зазор между трубками и термометром.

Эталонный термометр сопротивления Fluke 5699 устанавливается по середины на глубине ванны термостата, позволяющий измерять температуры ванны термостата.

Исследование разницы температур ванны и насытителя проведены в точках минус 50°C, 0°C, 20°C и результаты исследование представлены в рисунках 2.18-2.20.

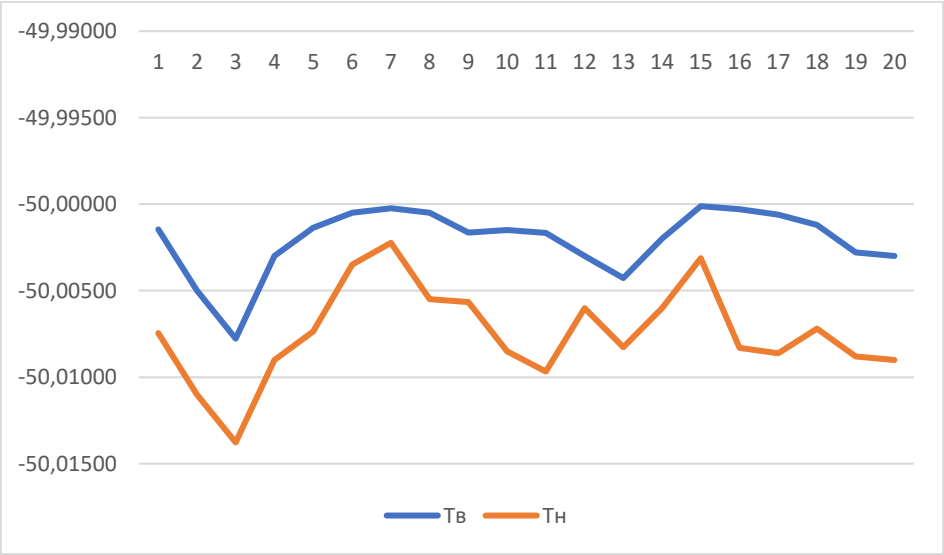


Рисунок 2.18 — Результаты измерений температур ванны и насытителя в точке минус 50 °C

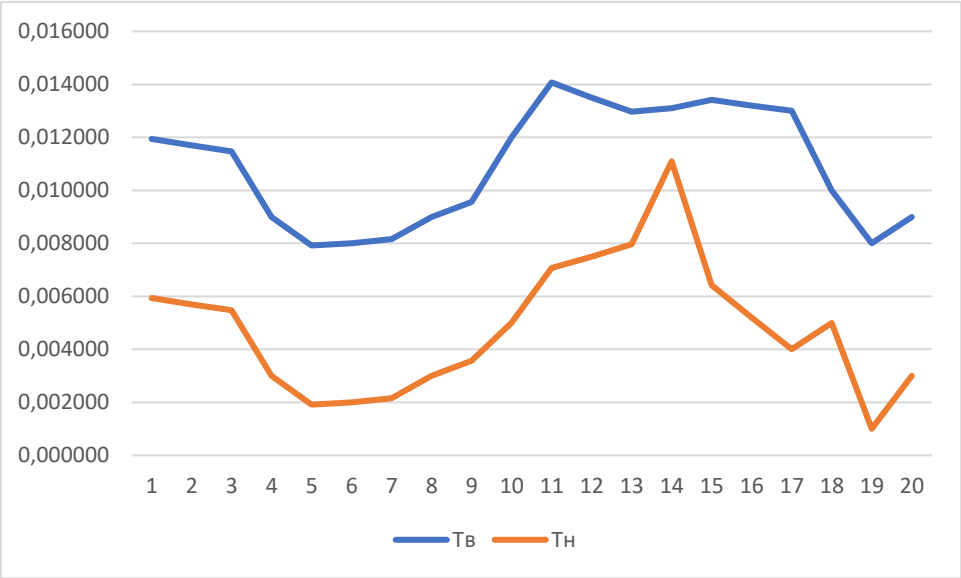


Рисунок 2.19 — Результаты измерений температур ванны и насытителя в точке 0 °С

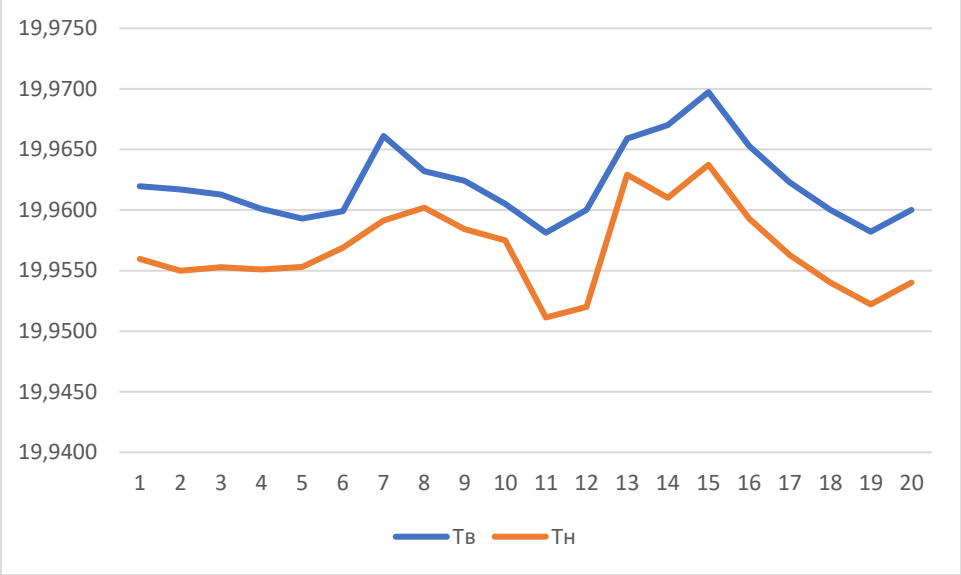


Рисунок 2.20 — Результаты измерений температур ванны и насытителя в точке плюс 20 °С

Разница между температурой ванны и насытителя не превышала 0,008°С, что является незначительным показателем, что позволяет приравнять температуру ванны к температуре насытителя.

Исследование изменения давления в насытителе в зависимости от скорости потока

Исследование проведено с использованием барометра БОП-1М-2 подключив к выходу насытителю и регулируя скорость влажного воздуха игольчатым клапаном, расположенным в генераторе точки росы DG-4.

Номинальный объёмный расход влажного газа устанавливается в следующих диапазонах в зависимости от типа подключаемого средства измерений:

- для конденсационных гигрометров точки росы/инея — от 0,5 до 1,0 л/мин;

- для кулонометрических гигрометров — от 1,0 до 2,0 л/мин.

Зависимость давления в насытителе от объёмного расхода газового потока при значениях 1 л/мин и 2 л/мин отражена на рисунке 2.21.

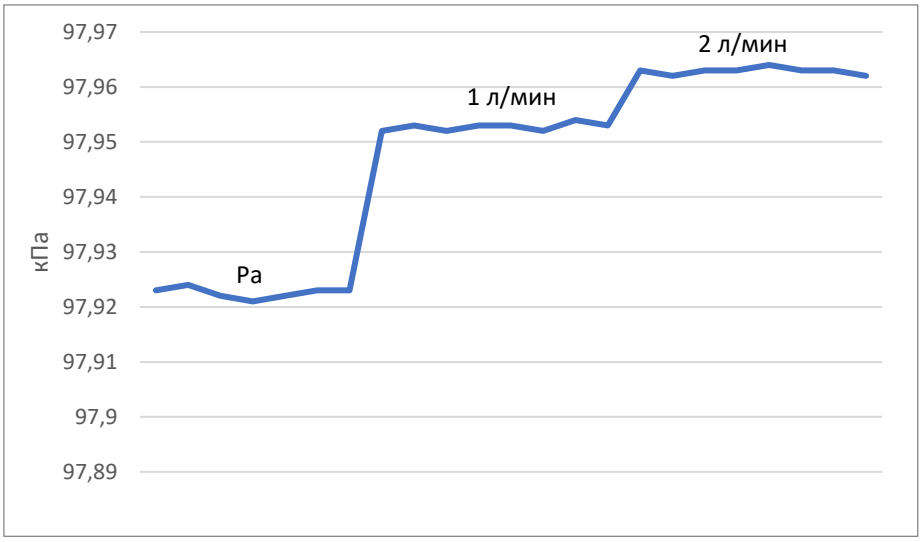


Рисунок 2.21 — Результаты измерений давления в насытителе в зависимости от скорости потока (Ра — атмосферное давление)

На графике видно, что при номинальном расходе 1 л/мин давление изменялось на 30 Па по сравнению с атмосферным давлением, при 2 л/мин оно изменялось на 40 Па.

Исследование стабилности воспроизведения температуры точки росы/инея

Стабильность воспроизводимого значения влажности является одним из ключевых показателей качества работы генератора влажности, поскольку варьирование уровня влажности в процессе измерений может приводить к систематическим погрешностям при поверке гигрометров с различной динамической чувствительностью. В связи с этим проведено исследование стабильности воспроизведения температуры точки росы/инея на протяжении 20 минут; результаты исследований представлены на рисунках 2.22 и 2.23.



Рисунок 2.22 — Результаты измерений при температуре точки инея минус 45 °С



Рисунок 2.23 — Результаты измерений при температуре точки росы плюс 18 °С

Среднее квадратичное отклонение при заданной температуры точки росы/инея не превышает 0,01℃.

2.3 Прослеживаемость единицы относительной влажности и объемной доли влаги от Государственного эталона единицы температуры точки росы/инея

Относительная влажность

Основным эталонным измерительным прибором в составе Государственного эталона единицы измерения относительной влажности является конденсационный гигрометр MBW 473-RP2, который имеет два датчика, один датчик зеркала точки росы и один датчик температуры. Датчик температуры, представляющий собой термометр сопротивления Pt100, имеет единицы измерения, которые прослеживается по таким реперным точкам, как тройная температура ртути,

тройная температура воды и температура плавления галлия. Датчик зеркала точки росы прослеживается от усовершенствованного государственного эталона единицы температуры точки росы/инея, и для этой цели была разработана камера влажности, в которую поступает влажный газ с известной температурой точки росы.

Камера влажности, разработанная для калибровки конденсационного гигрометра, показана на рисунке 2.24.

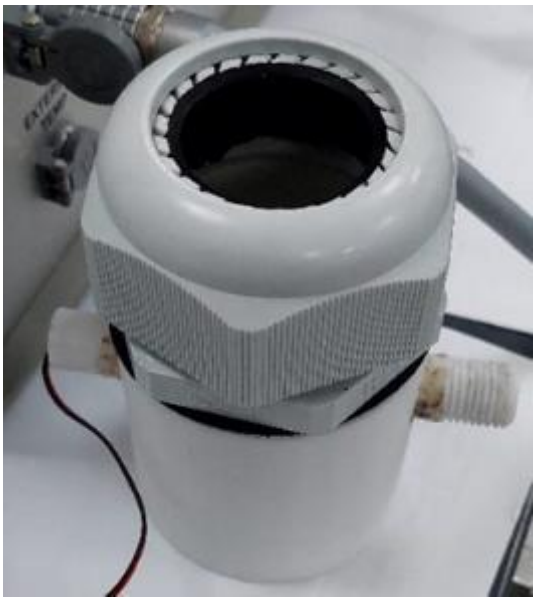


Рисунок 2.24 — Камера влажности

Камера влажности состоит из верхней и нижней частей, верхняя часть выполнена из PG 36, нижняя часть напечатана на 3D-принтере из ABS-пластика, где предусмотрены вход и выход газа, а внутри установлен вентилятор. Вентилятор сконструирован таким образом, чтобы обеспечивать движение потока внутри камеры, поскольку датчик зеркала точки росы модели 473-RP2 правильно измеряет температуру точки росы при движении газового потока.

Единица относительной влажности определяется соотношением молярной доли влаги температуры точки росы x_d и молярной доли влаги температуры камеры x_{ch}. Модель измерения для вычисления относительной влажности h формируется на основе входных величин t_d, t_{ch}, P с использованием уравнений (2.1–2.8). Поскольку давления P_s и P_{ch} являются равными между собой, они исключаются из рассмотрения в уравнении (2.22):

$$h = \frac{f\left(t_d, P\right) \times e\left(t_d\right)}{f\left(t_{ch}, P\right) \times e\left(t_{ch}\right)} \times 100\% \qquad (2.22)$$

где t_{ch} – температура в камере.

Суммарная стандартная неопределенность измерений относительной влажности $u_c(h)$ определяется следующим выражением (2.23):

$$u_c\left(h\right) = \sqrt{C\left(e_{tch}\right)^2 u\left(t_{ch}\right)^2 + C\left(e_{td}\right)^2 u\left(t_d\right)^2 + C\left(f_{tch}\right)^2 u\left(f_{tch}\right)^2 + C\left(f_{td}\right)^2 u\left(f_{td}\right)^2} \qquad (2.23)$$

Стандартная неопределённость вычисляется отдельно для каждого идентифицированного источника неопределённости. В частности, стандартная неопределённость, обусловленная температурой в камере, определяется следующим выражением(2.24):

$$u(t_{ch}) = \sqrt{u(\delta t_{ch.\ st})^2 + u(\delta t_{ch.cal})^2 + u(\delta t_{ch.\ drift})^2} \qquad (2.24)$$

$\delta t_{ch.\ st}$ – поправка на стабильность показаний;

$\delta t_{ch.\ cal}$ – поправка от сертификата калибровки термометра;

$\delta t_{ch.\ drift}$ – поправка на дрейф термометра.

Стандартная неопределённость температуры точки росы t_d определяется по аналогии с неопределённостью температуры в камере t_{ch}.

Расчёт относительной неопределённости $u_r(f)$ коэффициента эффективности водяного пара для влажного воздуха приведён в выражении (2.9). Значение неопределённости коэффициента эффективности водяного пара для влажного воздуха f находится в диапазоне от 0,0004 до 0,00055 при давлении P = 101325 Па. Принимая во внимание, что коэффициент чувствительности удовлетворяет условию $|C(f)| < 1$, вклад данной составляющей в суммарную неопределённость результата измерений является пренебрежимо малым.

Приборы для измерения влажности сконфигурированы с указанием нормального атмосферного давления для расчета влажности в различных единицах измерения. Учитывая тот факт, что государственный эталон относительной влажности находится в Астане, где за последние 5 лет диапазон атмосферного давления составлял от 95 до 102 кПа. Для учета влияния результатов измерения атмосферного давления была проанализирована разница между относительной влажностью при нормальном атмосферном давлении и относительной влажностью при 95 кПа и 106 кПа, которая не превышала 0,001%. Это может быть использовано в дальнейших расчетах как источник неточности значений атмосферного давления.

Разница значений относительной влажности при различных атмосферных давлениях показана на рисунке 2.25.

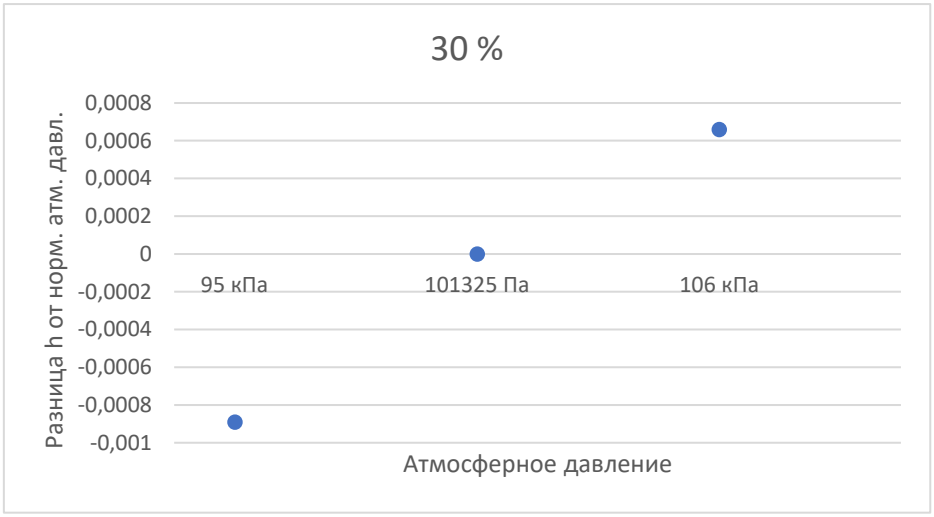


Рисунок 2.25 — Разница значений относительной влажности воздуха относительно нормального атмосферного давления

Уравнения определения коэффициентов чувствительности температуры точки росы t_{d} и температуры камеры t_{ch}. приведены ниже (2.25–2.26).

$$C\left(e_{td}\right)=e\left(t_d\right)'=T^{g_7-3}\times\exp\left(g_2\right)\times\left(4g_6T^6+3g_5T^5+2g_4T^4+g_3T^3+g_7T^2-g_1T-2g_0\right)$$

$$\times\exp\left(g_6T^4+g_5T^3+g_4T^2+g_3T+\frac{g_1}{T}+\frac{g_0}{T^2}\right)\times\frac{f\left(P,t_d\right)}{e\left(t_{ch}\right)f\left(P,t_{ch}\right)}100\% \qquad (2.25)$$

$$C\left(e_{tch}\right)=e\left(t_{ch}\right)'=-T^{g_7-3}\times\exp\left(g_2\right)\times\left(4g_6T^6+3g_5T^5+2g_4T^4+g_3T^3+g_7T^2-g_1T-2g_0\right)$$

$$\times\exp\left(g_6T^4+g_5T^3+g_4T^2+g_3T+\frac{g_1}{T}+\frac{g_0}{T^2}\right)\times\frac{e\left(t_d\right)f\left(P,t_d\right)}{e^2\left(t_{ch}\right)f\left(P,t_{ch}\right)}100\% \qquad (2.26)$$

Таблица 2.10 – Бюджет неопределенности измерений относительной влажности

Величина	Оценка	Стандартная неопределен-ность	Коэффициент чувствитель-ности	Вклад в неопределен-ность
t_{d}	1,93 °C	–	–	–
$\delta t_{\mathrm{d.\ cal}}$	0 °C	0,05 °C	2,146 % / °C	0,11 %
$\delta t_{\mathrm{d.\ st}}$	0 °C	0,02 °C	2,146 % / °C	0,04 %
$\delta t_{\mathrm{d.\ drift}}$	0 °C	0,01 °C	2,146 % / °C	0,02 %
t_{ch}	20,03 °C	–	–	–
$\delta t_{\mathrm{ch.\ cal}}$	0 °C	0,02 °C	-1,859 % / °C	-0,04 %
$\delta t_{\mathrm{ch.\ st}}$	0 °C	0,02 °C	-1,859 % / °C	-0,04 %
$\delta t_{ch.\ drift}$	0 °C	0,01 °C	-1,859 % / °C	-0,02 %
h_{c}	29,97 %	–	–	–

Продолжение таблицы 2.10

$h_{c.\,st}$	0 %	0,1 %	1	0,1 %
$h_{c.\,d}$	0,1%	0,029 %	1	0,029 %
Суммарная неопределенность	–	–	–	0,17 %
Расширенная неопределенность	–	–	–	0,34 %

Объемная доля влаги

Значение объёмной доли влаги (ОДВ) определяется косвенным методом измерений, основанным на известных значениях температуры точки росы t_s и давления газа в насытителе P_s.

Единица ОДВ воспроизводится с применением уравнения (2.2). Модель измерения для вычисления ОДВ x_w формируется на основе входных величин t_s, P_s и $e(t_s)$ с использованием уравнений (2.1–2.8):

$$x_w = \frac{f(t_s, P_s) \times e(t_s)}{P_s} \tag{2.27}$$

Суммарная стандартная неопределенность измерений объемной доли влаги $u_c(x_w)$ определяется следующим выражением (2.28):

$$u_c(x_w) = \sqrt{C(e_{ts})^2 u(t_s)^2 + C(e_{Ps})^2 u(P_s)^2 + C(f_{ts,Ps})^2 u(f_{ts,Ps})^2} \tag{2.28}$$

Стандартная неопределённость вычисляется отдельно для каждого идентифицированного источника неопределённости. В частности, стандартная неопределённость, обусловленная погрешностью измерения давления, определяется следующим выражением (2.29):

$$u(P_s) = \sqrt{u(\delta P_{s.st})^2 + u(\delta P_{s.cal})^2 + u(\delta P_{s.\,drift})^2} \tag{2.29}$$

$\delta P_{s.st}$ – поправка на стабильность показаний;

$\delta P_{s.cal}$ – поправка от сертификата калибровки барометра;

$\delta P_{s.\,drift}$ – поправка на дрейф барометра.

Стандартная неопределённость температуры насыщения t_s определяется по аналогии с неопределённостью давления P_s. При этом температура насыщения принимается равной температуре точки росы t_d, измеряемой посредством конденсационного гигрометра.

Значение неопределённости коэффициента эффективности водяного пара для влажного газа f находится в диапазоне от 3×10^{-6} до $1{,}3\times10^{-5}$ при давлении P = 101325 Па. Принимая во внимание, что коэффициент чувствительности удовлетворяет условию $|C(f)| < 1$, вклад данной

составляющей в суммарную неопределённость результата измерений является пренебрежимо малым.

Выражения для определения коэффициентов чувствительности по температуре насыщения t_s и давлению в насытителе приведены ниже (2.30–2.31).

$$C\left(e_{ts}\right)=e\left(t_s\right)'=T^{g_7-3}\times\exp\left(g_2\right)\times\left(4g_6T^6+3g_5T^5+2g_4T^4+g_3T^3+g_7T^2-g_1T-2g_0\right)$$

$$\times\exp\left(g_6T^4+g_5T^3+g_4T^2+g_3T+\frac{g_1}{T}+\frac{g_0}{T^2}\right)\times\frac{f\left(t_s,P_s\right)}{P_s} \qquad (2.30)$$

$$C(P_s)=-\frac{f\left(t_s,P_s\right)\times e\left(t_s\right)}{P_s^2} \qquad (2.31)$$

Таблица 2.11 – Бюджет неопределенности измерений ОДВ

Величина	Оценка	Стандартная неопределен-ность	Коэффициент чувствитель-ности	Вклад в неопределен-ность
t_d	-23,00 °C	–	–	–
$\delta t_{d.\,cal}$	0 °C	0,05 °C	84,7150 млн$^{-1}$ / °C	4,236 млн$^{-1}$
$\delta t_{d.\,st}$	0 °C	0,02 °C	84,7150 млн$^{-1}$ / °C	1,694 млн$^{-1}$
$\delta t_{d.\,drift}$	0 °C	0,01 °C	84,7150 млн$^{-1}$ / °C	0,847 млн$^{-1}$
P_s	101325 Па	–	–	–
$\delta P_{s.\,cal}$	0 Па	5,78 Па	-0,009 млн$^{-1}$ / Па	-0,052 млн$^{-1}$
$\delta P_{s.st}$	0 Па	5,00 Па	-0,009 млн$^{-1}$ / Па	-0,045 млн$^{-1}$
$\delta P_{s.\,drift}$	0 Па	3,00 Па	-0,009 млн$^{-1}$ / Па	-0,027 млн$^{-1}$
x_w	958 млн$^{-1}$	–	–	–
$h_{c.\,d}$	1 млн$^{-1}$	0,289 млн$^{-1}$	1	0,289 млн$^{-1}$
Суммарная неопределенность	–	–	–	4,65 млн$^{-1}$
Расширенная неопределенность	–	–	–	9,3 млн$^{-1}$
Относительная расширенная неопределенность	–	–	–	0,97%

Значение атмосферного давления оказывает существенное влияние на результаты измерений объёмной доли влаги. Поскольку кулонометрические гигрометры проходят настройку при нормальном атмосферном давлении, отклонение фактического атмосферного давления от нормального значения в процессе измерений обусловливает возникновение дополнительной погрешности результатов определения ОДВ. Значения относительной погрешности ОДВ, соответствующие различным значениям атмосферного давления, отличающимся от нормального, при температуре точки росы минус 30 °С приведены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 — Относительная погрешность измерений объёмной доли влаги при различных значениях атмосферного давления относительно нормального атмосферного давления

Атмосферное давления, кПа	Объемная доля влаги, млн$^{-1}$	Относительная погрешность ОДВ, %
84	609,73	20,53
95	539,41	6,63
96	533,81	5,52
97	528,33	4,44
98	522,97	3,38
99	517,71	2,34
100	512,55	1,32
101	507,5	0,32
101,325	505,88	0,00
102	502,55	-0,66
103	497,69	-1,62
104,6	490,12	-3,12
106	483,67	-4,39

Кулонометрические гигрометры рассчитаны на работу при объёмном расходе газа, не превышающем 2 л/мин. В ходе экспериментальных исследований зафиксированы отклонения давления в трубопроводе от атмосферного давления, составившие 30 Па и 40 Па при расходах 1 л/мин и 2 л/мин соответственно. Полученные значения подлежат учёту в последующих расчётах в качестве составляющей неопределённости, обусловленной отличием давления в насытителе от атмосферного.

2.4 Программная реализация применения коэффициентов чувствительности в составе аппаратно-программного комплекса первичного эталона

Уравнения, определяющие коэффициенты чувствительности входных величин при передаче размера единицы температуры точки росы/инея к единицам относительной влажности и объёмной (молярной) доли влаги, получены в подразделе 2.3 — выражения (2.25), (2.26) для коэффициентов $C(t_d)$ и $C(t_{ch})$, участвующих в модели измерения относительной влажности, и выражения (2.30), (2.31) для коэффициентов $C(t_s)$ и $C(P)$, участвующих в модели измерения молярной доли влаги. В настоящем подразделе рассматривается практическое применение указанных коэффициентов чувствительности в программной части аппаратно-программного комплекса (АПК) первичного эталона: состав программных модулей, последовательность их вызова в течение одного измерительного цикла, источники входных данных от электрических измерительных каналов и форма представления результата.

2.4.1 Назначение и состав программной части АПК

Программная часть АПК предназначена для автоматизации измерительного цикла первичного эталона и решает следующие основные задачи: сбор результатов электрических измерений с измерителя Fluke 1594A и барометра БОП-1М-2 в режиме реального времени; преобразование результатов измерения сопротивления платиновых термометров в значения температуры по МТШ-90; идентификация температуры точки росы по результатам исследований работы насытителя малого объёма (раздел 2.2); расчёт относительной влажности и молярной доли влаги; применение коэффициентов чувствительности (2.25)–(2.26) и (2.30)–(2.31) для оценивания неопределённости производных параметров влажности; формирование протокола измерений.

Состав программных модулей АПК и распределение между ними входных и выходных данных приведены в таблице 2.13. Модули 1–3 обеспечивают взаимодействие с электрическими измерительными каналами; модули 4–7 — вычисление температуры точки росы и производных параметров влажности; модуль 8 реализует применение коэффициентов чувствительности; модуль 9 выполняет оценивание неопределённости; модуль 10 формирует выходной протокол.

Таблица 2.13 — Состав программных модулей АПК и распределение электрических измерительных данных по модулям

№	Программный модуль	Входные данные (электрические измерения)	Выходные данные (значения для протокола)
1	Драйвер термометрического измерителя Fluke 1594A	Сопротивление R_s термометра ЭТС-100 в насытителе; сопротивление R_v термометра Fluke 5699 в жидкостной ванне	Значения сопротивления R_s, R_v, Ом
2	Модуль преобразования R → T по МТШ-90	R_s, R_v и индивидуальные градуировочные характеристики каждого ПТС	Температура потока t_s в насытителе и температура жидкостной ванны t_v, °C
3	Драйвер барометра БОП-1М-2	Цифровой выходной сигнал барометра	Атмосферное давление P, кПа
4	Модуль идентификации температуры точки росы t_d	t_v, t_s	Температура точки росы/инея t_d, °C
5	Модуль расчёта давления насыщенного пара	t_d (для $e_w(t_d)$) и t_{ch} (для $e_w(t_{ch})$)	$e_w(t_d)$, $e_w(t_{ch})$, Па (по формулам 2.4–2.5)
6	Модуль расчёта коэффициента эффективности	P, t_d, t_ch	f(P, t_d), f(P, t_{ch}) (по формулам 2.6–2.8)
7	Модуль расчёта производных параметров влажности	Результаты модулей 4–6	Относительная влажность h, %; молярная доля влаги x_w, млн$^{-1}$
8	Модуль применения коэффициентов чувствительности	t_d, t_{ch}, P (через интерполяцию по таблицам 2.10, 2.11)	Коэффициенты $C(t_d)$, $C(t_{ch})$, $C(t_s)$, C(P), C_R
9	Модуль оценивания неопределённости	Стандартные неопределённости u(R), u(P), u(f), коэффициенты чувствительности из модуля 8	Стандартная $u_c(h)$, $u_c(x_w)$ и расширенная U неопределённость (k = 2)
10	Модуль формирования протокола	Результаты модулей 4, 7 и 9	Протокол измерений

2.4.2 Последовательность операций измерительного цикла

Один измерительный цикл АПК выполняется в следующей последовательности.

1) Драйвер измерителя Fluke 1594A выполняет четырёхпроводное измерение сопротивления термометров ЭТС-100 и Fluke 5699 в соответствии с запрограммированным тактом опроса; полученные значения R_s и R_v поступают в модуль преобразования.

2) Модуль преобразования по МТШ-90 рассчитывает значения температуры потока в насытителе t_s и температуры жидкостной ванны t_v с использованием индивидуальных градуировочных характеристик каждого термометра, хранящихся в энергонезависимой памяти АПК; коэффициент чувствительности $C_R = dT/dR$ применяется для пересчёта неопределённости $u(R)$ измерительного канала в неопределённость $u(T)$ на входе модуля оценивания неопределённости.

3) Модуль идентификации температуры точки росы t_d сравнивает значения t_v и t_s; при выполнении условия $|t_v - t_s| \leq 0{,}01$ °C принимается $t_d = t_s$, что соответствует достижению термодинамического равновесия между газовой и жидкой (либо твёрдой) фазами в насытителе.

4) Драйвер барометра БОП-1М-2 опрашивает прибор и помещает значение атмосферного давления P в общий буфер данных цикла.

5) Модуль расчёта давления насыщенного пара по формулам Харди (2.4) над водой или (2.5) надо льдом — с автоматическим выбором по знаку t_d — вычисляет $e_w(t_d)$ и $e_w(t_{ch})$, где t_{ch} — температура в камере относительной влажности.

6) Модуль расчёта коэффициента эффективности по формулам (2.6)–(2.8) вычисляет $f(P, t_d)$ и $f(P, t_{ch})$.

7) Модуль расчёта производных параметров вычисляет значения относительной влажности h по модели (2.22) и объёмной доли влаги x_w по модели (2.27).

8) Модуль применения коэффициентов чувствительности вычисляет численные значения $C(t_d)$, $C(t_{ch})$ по выражениям (2.25), (2.26) и численные значения $C(t_s)$, $C(P)$ по выражениям (2.30), (2.31) в текущей рабочей точке (t_d, t_{ch}, P) измерительного цикла. Аналитически полученные выражения вычисляются по фактическим текущим значениям входных величин, то есть коэффициенты чувствительности обновляются в каждом цикле и соответствуют конкретному значению воспроизводимой влажности.

9) Модуль оценивания неопределённости вычисляет суммарную стандартную неопределённость измерений относительной влажности по соотношению (2.23) и суммарную стандартную неопределённость измерений объёмной доли влаги по соотношению (2.28). Все составляющие, входящие в эти соотношения, умножаются на соответствующие коэффициенты чувствительности, вычисленные модулем 8 в текущей рабочей точке; стандартная

неопределённость коэффициента эффективности $u_r(f)$ учитывается через (2.9). Расширенная неопределённость рассчитывается с коэффициентом охвата k = 2.

10) Модуль формирования протокола сохраняет результаты цикла: значения t_d, h, x_w, текущие значения коэффициентов чувствительности, составляющие бюджета неопределённости и расширенную неопределённость U(h), $U(x_w)$. Протокол формируется в табличной форме, соответствующей приложению настоящей работы.

2.4.3 Особенности применения коэффициентов чувствительности в режиме реального времени

Применение коэффициентов чувствительности в программной части АПК имеет несколько существенных особенностей, отличающих реализацию настоящей работы от ранее применявшихся методик.

Во-первых, коэффициенты чувствительности $C(t_d)$, $C(t_{ch})$, $C(t_s)$ и C(P) не задаются константами, а вычисляются в каждом измерительном цикле по фактическим текущим значениям входных величин. Это обусловлено сильной нелинейностью функции $e_w(t_d)$: чувствительность производных параметров влажности к температуре точки росы существенно зависит от значения t_d в рабочем диапазоне эталона. Использование табулированных констант, осреднённых по диапазону, привело бы к систематической ошибке оценивания неопределённости, поэтому в составе АПК реализован повторный расчёт коэффициентов в каждом цикле.

Во-вторых, входными данными для расчёта коэффициентов чувствительности являются результаты прецизионных электрических измерений: сопротивление ПТС, преобразованное в температуру по МТШ-90, и атмосферное давление, полученное от барометра БОП-1М-2. Тем самым неопределённость электрических измерений непосредственно влияет на неопределённость применяемых коэффициентов чувствительности — этот вклад учитывается в модуле оценивания неопределённости как составляющая второго порядка и при типичных значениях u(R), u(P) оказывается пренебрежимо малым (условие $|C(f)| < 1$, установленное в разделе 2.3, остаётся справедливым).

В-третьих, программная реализация коэффициентов чувствительности согласована с экспериментальными результатами работы насытителя малого объёма (раздел 2.2): на вход модуля идентификации t_d поступает не идеализированное значение температуры жидкостной ванны, а скорректированное значение с учётом установленной экспериментально поправки δt. Это обеспечивает соответствие фактическим режимам работы насытителя и сохраняет корректность последующего применения коэффициентов чувствительности.

2.4.4 Главное окно интерфейса программы АПК

Программная часть аппаратно-программного комплекса реализована в среде графического программирования NI LabVIEW (виртуальный инструмент Main.vi). На рисунке 2.26 представлен скриншот главного окна интерфейса оператора, иллюстрирующий состояние АПК в момент завершения измерительного цикла. В окне одновременно отображаются результаты прямых электрических измерений (сопротивления термометров и атмосферного давления), косвенно полученные значения температур (t_s, t_v, t_d, t_{ch}), воспроизводимые единицы влажности (h, x_w) с расширенными неопределённостями, текущие значения коэффициентов чувствительности и состояние конвейера программных модулей. Лог измерительного цикла, выводимый в нижней части окна, дублирует ключевые этапы выполнения программных модулей с указанием меток времени.

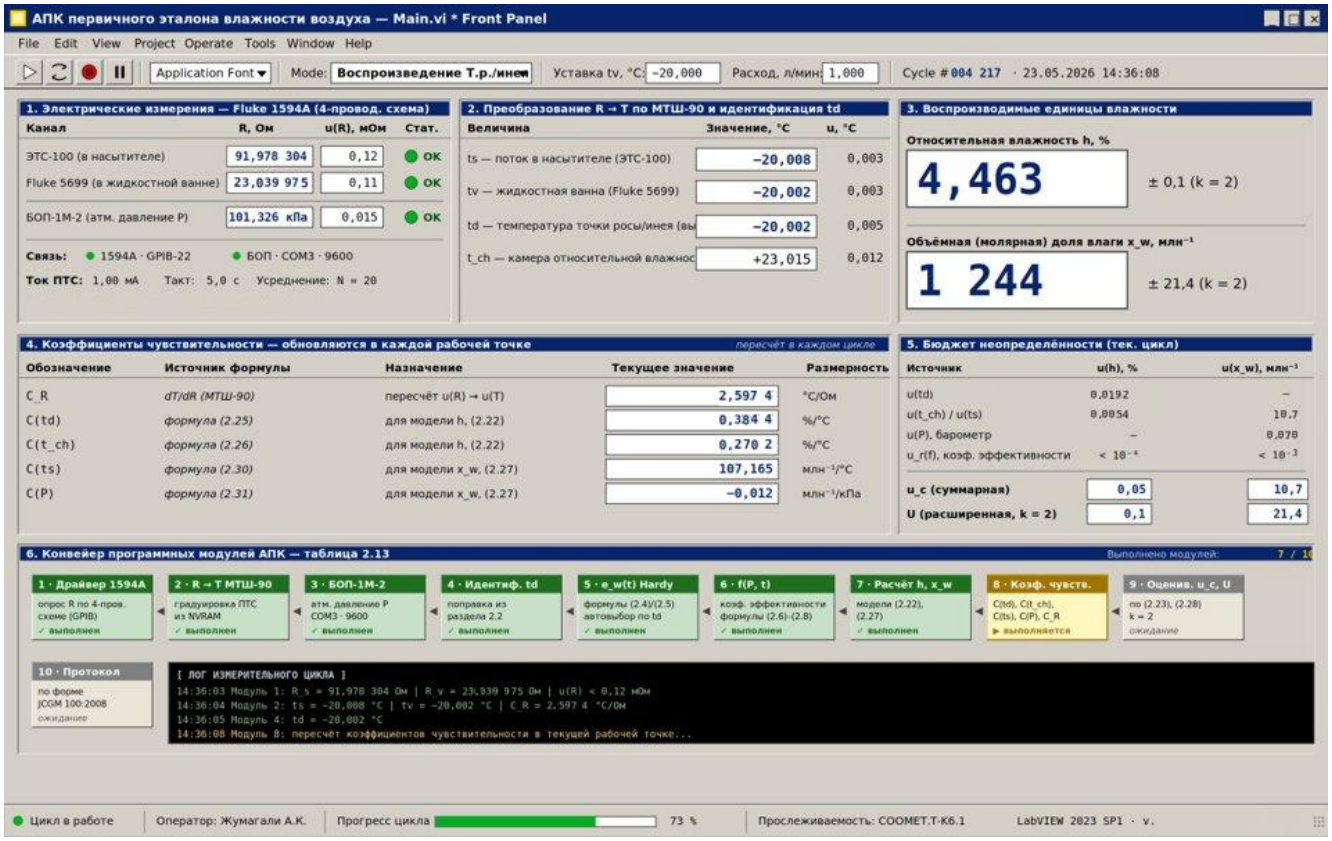


Рисунок 2.26 — Главное окно интерфейса программы АПК (LabVIEW) по завершении измерительного цикла

Структура окна соответствует таблице 2.13: панели 1–3 отображают входные электрические измерения и условия эксперимента, панель 4 — текущие значения коэффициентов чувствительности, рассчитанные модулем 8, панель 5 — бюджет неопределённости в рабочей точке, панель 6 — статус конвейера программных модулей с цветовой индикацией: зелёный — модуль выполнен, жёлтый — модуль выполняется в текущий момент, серый — модуль ожидает

запуска. По завершении цикла программа АПК автоматически формирует протокол измерений в формате xlsx.

Выводы по главе 2

Во второй главе диссертационной работы представлена научно-техническая основа усовершенствованного Государственного эталона температуры точки росы/инея и первичного эталона влажности газов, реализованных в виде аппаратно-программного комплекса с прецизионными измерительными каналами температуры.

В подразделах 2.1–2.3 описана структура эталонного комплекса, обоснован выбор средств измерений, разработана методика прослеживаемости единицы относительной влажности и объёмной (молярной) доли влаги от единицы температуры точки росы/инея, получены выражения для коэффициентов чувствительности (2.25), (2.26), (2.30), (2.31) и сформированы сводные бюджеты неопределённости измерений (таблицы 2.10, 2.11). Установлена закономерность: расширенная неопределённость измерений убывает с увеличением площади поверхности воды в насытителе, что определяется принципиальными особенностями реализации метода фазового равновесия. Разработан насытитель малого объёма, на который получен патент на полезную модель KZ 9626 от 04.10.2024.

В подразделе 2.4 разработана программная часть АПК в среде NI LabVIEW. Программа в каждом измерительном цикле выполняет сбор данных с измерительных каналов, преобразование сопротивления ПТС в температуру по МТШ-90, пересчёт коэффициентов чувствительности по фактическим входным величинам и формирование протокола в формате xlsx.

Совокупность результатов раздела 2 создаёт научно-техническую основу для совершенствования Государственного эталона единицы температуры точки росы/инея Республики Казахстан. Применение АПК позволяет снизить неопределённость воспроизведения единицы по составляющей типа А — в 10 раз, по составляющей типа В — на 42 % относительно характеристик действующего эталона и поверочной схемы. Результаты подтверждены в международных ключевых сличениях COOMET.T-K6.1.

Материалы раздела 2 опубликованы в работах [77, 112, 113, 125].

ГЛАВА 3. СЛИЧЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ЕДИНИЦЫ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОЧКИ РОСЫ/ИНЕЯ В ВНИИФТРИ И КАЗСТАНДАРТЕ

Международные сличения в области измерений влажности проводятся на глобальном и региональном уровнях с целью обеспечения взаимного признания национальных реализаций шкалы температуры точки росы/инея. Ввиду значительных временны́х интервалов между циклами региональных ключевых сличений подтверждение возможностей новых или существенно модернизированных эталонов отдельных стран может осуществляться посредством двусторонних сравнительных измерений.

Сличение COOMET.T-K6.1, представляющее собой евроазиатский этап ключевых сравнений в области измерений влажности, было завершено в 2025 году [114]. До проведения модернизации РГП «КазСтандарт» не имело возможности участвовать в ключевых сличениях, поскольку располагало лишь вторичным эталоном — системой калибровки температуры точки росы. Создание первичного эталона поставило задачу экспериментального подтверждения его измерительных возможностей. С этой целью было принято решение о проведении двусторонних сличений между РГП «КазСтандарт» и ВНИИФТРИ. Как участник ключевых сличений CCT-K6 с установленными измерительными возможностями, ВНИИФТРИ обеспечило метрологическую прослеживаемость результатов с нормированной неопределённостью [115]. Программа двусторонних сличений формировалась по аналогии с методологией сличений серии K6 с тем отличием, что в качестве переносного эталона применялся одиночный конденсационный гигрометр с охлаждаемым зеркалом [116–119]. Результаты успешно завершённых измерений служат документальным подтверждением измерительных возможностей РГП «КазСтандарт» и положены в основу публикации соответствующих CMC-строк в базе данных CIPM MRA KCDB, а также расширения области аккредитации.

3.1 Организация сличения

Принцип работы первичных генераторов точки росы в обеих лабораториях (ВНИИФТРИ и КазСтандарт) основан на методе фазового равновесия, при котором насыщение газа происходит за один проход через насытитель. Насытитель погружается в ванну и подводится непосредственно к гигрометрам с умеренной точкой росы газа без регулирования давления. Подробное описание генераторов приведены в главе 2 и в литературе [120-123].

Осуществление сличения и измерения

Основной цикл измерений (KazStandard1) проводился в два этапа: сначала в КазСтандарте — с сентября по октябрь 2024 г., затем во ВНИИФТРИ — с ноября по декабрь 2024 г. Для

проверки долгосрочной стабильности переносного эталона в январе 2025 г. КазСтандарт провёл дополнительный сокращённый цикл (KazStandard2). Полная программа измерений включает четыре повторяемых серии при номинальных значениях температуры точки росы/инея: −50 °C, −30 °C, −10 °C, 1 °C и 20 °C. Каждое номинальное значение воспроизводилось четырежды для снижения вклада случайной составляющей нестабильности переносного эталона; воспроизводимость обеспечивалась восстановлением слоя конденсата на зеркале перед каждым повторным измерением. В каждой точке показания гигрометра контролировались до достижения критерия стабильного состояния, принятого в лаборатории. Во ВНИИФТРИ типичное время мониторинга составляло около 4 часов при −50 °C и около 1 часа при остальных значениях; в КазСтандарте — 3 ч при −50 °C, 2 ч при −30 °C и −10 °C и 0,5 ч при 1 °C и 20 °C.

3.2 Переносной эталон

В качестве переносного эталона при сличении использовался гигрометр точки росы с охлаждаемым зеркалом британского производителя «Michell Instruments Ltd», модель S8000 RS, серийный номер 143381. Температура точки росы/инея определяется по показаниям гигрометра.

Принцип измерения встроенного датчика температуры точки росы/инея описан ниже. Оптический излучатель направляет световой поток на полированное зеркало, температура которого прецизионно регулируется трёхкаскадным тепловым насосом на элементах Пельтье (рисунок 3.1); отвод тепла от горячей стороны крайнего каскада обеспечивается компрессорным хладагентом. Температура зеркальной поверхности измеряется прецизионным платиновым термометром сопротивления, закреплённым с обратной стороны зеркала. Фотодатчик непрерывно регистрирует интенсивность отражённого излучения: при чистой сухой поверхности она максимальна, тогда как образование слоя конденсата или инея вызывает её снижение. Сигнал фотодатчика используется как управляющий сигнал в замкнутом контуре регулирования температуры зеркала — таким образом, чтобы толщина конденсированного слоя оставалась постоянной. При этих условиях зеркало находится в состоянии динамического равновесия с окружающим воздухом, а его температура практически совпадает с температурой точки росы/инея измеряемого газа.

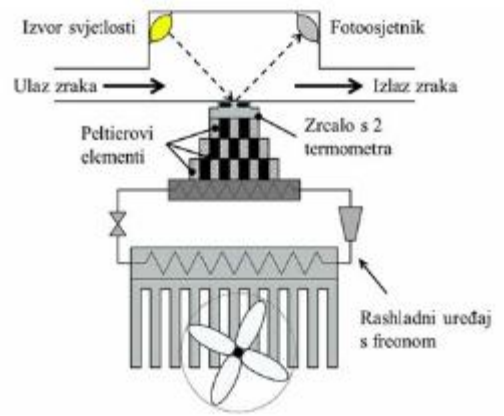


Рисунок 3.1 – Конструкция датчика конденсационного гигрометра

Характеристики стабильности переносного эталона в ходе сличения оценена, проанализировав разницу между значениями генератора и гигрометра КазСтандарта выполненные в сентябре 2024 г. - октябре 2024 г. и январе 2025 г. Максимальная величина разницы между сравнениями за сентябрь 2024 г. - октябрь 2024 г. и за январь 2025 г. составляет приблизительно 0,014 °C. В бюджет неопределенности добавлено компонент неопределенности типа B из-за возможности смещения переносного эталона. Основываясь на результатах, приведенных на рисунке 3.2, было оценено стандартная неопределенность в 0,008 °C (0,014/√3) для сличения с КазСтандарт- ВНИИФТРИ.

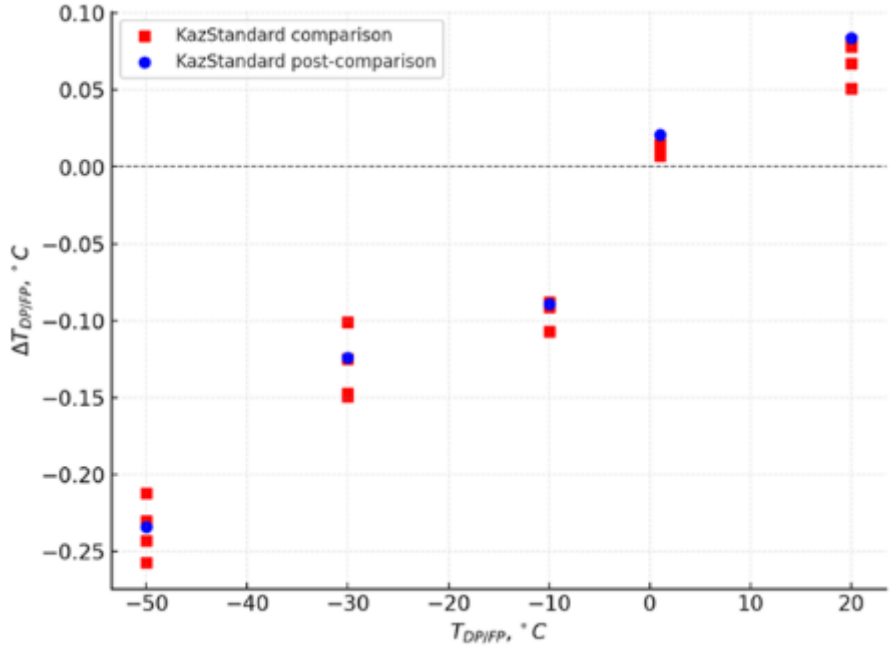


Рисунок 3.2 - Результаты измерений КазСтандарта в начале и в конце сличения

3.3 Результаты сличения

Результаты измерений каждой лаборатории-участницы ($\Delta T_{DP/FP}$) в каждой точке сличения выражаются в виде разности между эталонным значением температуры точки росы/инея, воспроизводимым генератором ($T^{g}_{DP/FP}$), и соответствующим значением, измеренным переносным эталоном ($T^{m}_{DP/FP}$).

Таблица 3.1 содержит значения указанной разности между воспроизведённой и измеренной температурами точки росы/инея $\Delta T_{DP/FP}$, полученные по итогам четырёх последовательных измерений. Для каждого номинального значения температуры результаты $\Delta T_{DP/FP}$, полученные ВНИИФТРИ и РГП «КазСтандарт», выделены в самостоятельные строки, тогда как результаты каждого отдельного измерения отражены в соответствующих столбцах. В двух итоговых столбцах таблицы представлены среднее арифметическое значение и среднеквадратическое отклонение совокупности результатов измерений. Графическая интерпретация данных таблицы 3.1 приведена на рисунке 3.3.

Таблица 3.1 — Разность между воспроизведённой и измеренной температурами точки росы/инея $\Delta T_{DP/FP}$ для ВНИИФТРИ и РГП «КазСтандарт»

Номинальное значение $T_{DP/FP}$ (°C)	НМИ	Изм. 1 $\Delta T_{DP/FP}$ (°C)	Изм. 2 $\Delta T_{DP/FP}$ (°C)	Изм. 3 $\Delta T_{DP/FP}$ (°C)	Изм. 4 $\Delta T_{DP/FP}$ (°C)	$\overline{\Delta T_{DP/FP}}$, (°C)	$\sigma(\Delta T_{DP/FP})$ (°C)
-50	КазСтандарт	-0,243	-0,257	-0,230	-0,212	-0,236	0,019
-50	ВНИИФТРИ	-0,2401	-0,2367	-0,2512	-0,2486	-0,2442	0,007
-30	КазСтандарт	-0,101	-0,149	-0,125	-0,147	-0,131	0,022
-30	ВНИИФТРИ	-0,1689	-0,1495	-0,1466	-0,1631	-0,1570	0,011
-10	КазСтандарт	-0,088	-0,107	-0,089	-0,091	-0,094	0,009
-10	ВНИИФТРИ	-0,1118	-0,1085	-0,1124	-0,1178	-0,1126	0,004
1	КазСтандарт	0,007	0,011	0,013	0,015	0,012	0,003
1	ВНИИФТРИ	-0,0648	-0,0613	-0,0621	-0,0619	-0,0625	0,002
20	КазСтандарт	0,082	0,078	0,051	0,067	0,070	0,014
20	ВНИИФТРИ	-0,0970	-0,0401	-0,0287	-0,0344	-0,0501	0,032

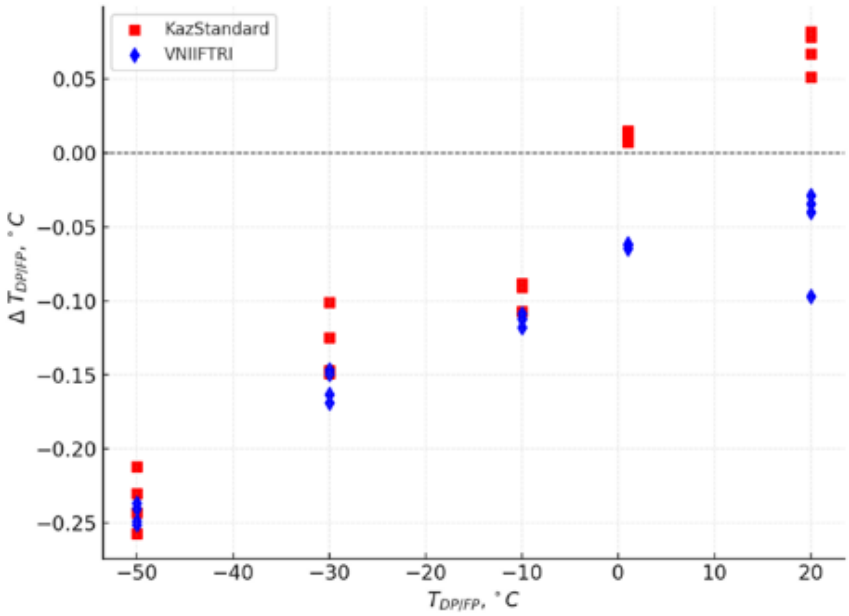


Рисунок 3.3 — Разность между воспроизведёнными и измеренными температурами точки росы/инея $\Delta T_{DP/FP}$ для ВНИИФТРИ и РГП «КазСтандарт»

На основании результатов исследований отдельных компонентов генератора точки росы/инея был составлен бюджет неопределенности реализации КазСтандарта (таблица 3.2). Вклад каждого компонента показан в °C и приведен для несколько точек реализации.

Таблица 3.2 – Компоненты неопределенности и их стандартные значения неопределенности для генератора КазСтандарта, в °C, для пяти номинальных значений $T_{DP/FP}$.

Неопределенность для генератора КазСтандарта:	**T_{DP}=20°C**	**T_{DP}=1°C**	**T_{FP}= -10°C**	**T_{FP}= -30°C**	**T_{FP}=-50°C**
Калибровка SPRT	0,003	0,003	0,003	0,003	0,005
Дрейф SPRT	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Гистерезис SPRT	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
Самонагрев SPRT	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Калибровка моста сопротивления	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012	0,00012
Разрешение моста сопротивления	0,000289	0,000289	0,000289	0,000289	0,000289
Дрейф моста сопротивления	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
Однородность температуры ванны	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
Стабильность температуры ванны	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
Эффективность насытителя	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Суммарная стандартная неопределенность:	**0,053**	**0,053**	**0,053**	**0,053**	**0,053**

3.4 Степень эквивалентности

Степень эквивалентности лаборатории определено с помощью значении разности $D_{KazStandard/VNIIFTRI}(T_{DP/FP})$:

$$D_{KazStandard/VNIIFTRI}(T_{DP/FP})=[\Delta T_{DP/FP}]_{KazStandard} - [\Delta T_{DP/FP}]_{VNIIFTRI}+\delta_{stab} \quad (3.1)$$

Соответствующая стандартная неопределенность степени эквивалентности определяется с помощью уравнения:

$$u[D_{KazStandard/VNIIFTRI}(T_{DP/FP})]=\sqrt{[u_c^2(\Delta T_{DP/FP})]_{\mathrm{KazStandard}} + [u_c^2(\Delta T_{DP/FP})]_{\mathrm{VNIIFTRI}} + u_{stab}^2} \quad (3.2)$$

По результатам расчётов установлено, что среднее значение поправки на нестабильность переносного эталона (δstab) в уравнении (3.1) принято равным нулю; метод вычисления и значения соответствующей стандартной неопределённости изложены в разделе 3.2.2.

Результаты анализа представлены в таблице 3.3. Видно, что во всех точках $D_{KazStandard/VNIIFTRI} < U(D_{KazStandard/VNIIFTRI})$, что подтверждает хорошее согласие между лабораториями. Степень эквивалентности лежит в пределах от 0,01 °C до 0,12°C с расширенной неопределенностью измерений менее 0,13°C.

Таблица 3.3 — Степень эквивалентности между значениями температуры точки росы/инея $T_{DP/FP}$, воспроизводимыми РГП «КазСтандарт» и ВНИИФТРИ, и её расширенная неопределённость ($k = 2$)

Nominal $T_{DP/FP}$, °C	$D_{KazStandard/VNIIFTRI,}$ °C	$U(D_{KazStandard/VNIIFTRI})$, °C
20	0,120	0,131
1	0,075	0,110
-10	0,019	0,120
-30	0,026	0,126
-50	0,008	0,125

3.5 Сопоставление результатов с контрольными значениями ключевых сличений CCT-K6

Полученные результаты двусторонних сличений допускают привязку к контрольным значениям ключевых сличений CCT-K6 (KCRV) посредством ВНИИФТРИ в рабочем диапазоне температур точки росы/инея от минус 50 °C до плюс 20 °C. Поскольку двусторонние сличения выполнялись после завершения CCT-K6, а ВНИИФТРИ в обоих случаях применяло один и тот

же первичный эталон, отклонение реализации РГП «КазСтандарт» от KCRV (DKazStandard/KCRV) определяется по формуле:

$$D_{KazStandard/KCRV}(T_{DP/FP}) = D_{KazStandard/VNIIFTRI}(T_{DP/FP}) + D_{VNIIFTRI/KCRV}(T_{DP/FP}) \quad (3.3)$$

где $D_{VNIIFTRI/KCRV}(T_{DP/FP})$ представляет собой разницу между результатами ВНИИФТРИ и KCRV, определенную в сравнении CCT-K6. Расширенная неопределенность реализации рассчитывается с использованием выражения:

$$U^2(D_{KazStandard/KCRV}) = U^2(D_{KazStandard/VNIIFTRI}) + U^2(D_{VNIIFTRI/KCRV}) \quad (3.4)$$

Корреляционный член между DKazStandard/VNIIFTRI и DVNIIFTRI/KCRV в уравнении (3.4) не учитывается, что несколько увеличивает суммарную неопределённость, поскольку истинное значение коэффициента корреляции отрицательно. Природа этой корреляции обусловлена тем, что ряд составляющих неопределённости — в частности, долговременная нестабильность термометров и ограниченная эффективность насытителей — является общим для обоих сличений и не переопределяется при каждом измерении независимо.

Соответствующие значения $D_{VNIIFTRI/KCRV}$ и $U(D_{VNIIFTRI/KCRV})$ из [115] приведены в таблице 3.4:

Таблица 3.4 – Степень эквивалентности между $T_{DP/FP}$, реализованной ВНИИФТРИ, и KCRV, $D_{VNIIFTRI/KCRV}$, и ее расширенная неопределенность (k = 2), $U(D_{VNIIFTRI/KCRV})$, при значениях $T_{DP/FP}$ +20 °C, 1 °C, −10 °C, −30 °C и −50 °C, как указано в таблицах 7.3 и 7.4 в [115].

Nominal $T_{DP/FP}$, °C	$D_{VNIIFTRI/KCRV}$, °C	$U(D_{VNIIFTRI/KCRV})$, °C
20	-0,003	0,046
1	-0,026	0,058
-10	-0,031	0,041
-30	-0,013	0,038
-50	-0,011	0,032

Объединение результатов таблиц 3.2-3.3 с использованием уравнений 3.3-3.4 дает значения $D_{KazStandard/KCRV}$ и $U(D_{KazStandard/KCRV})$:

Таблица 3.5 – Степень эквивалентности между $T_{DP/FP}$, реализованной ВНИИФТРИ, и KCRV, $D_{VNIIFTRI/KCRV}$, и ее расширенная неопределенность (k = 2), $U(D_{VNIIFTRI/KCRV})$

Nominal $T_{DP/FP}$, °C	$D_{KazStandard/KCRV}$, °C	$U(D_{KazStandard/KCRV})$, °C
20	0,117	0,139
1	0,049	0,124
-10	-0,012	0,127
-30	0,013	0,132
-50	-0,003	0,129

Результаты сопоставления воспроизведения единицы температуры точки росы/инея РГП «КазСтандарт» с контрольными значениями ключевых сличений CCT-K6 представлены на рисунке 3.4 и в таблице 3.5. Отклонение результатов РГП «КазСтандарт» от контрольных значений KCRV составляет от минус 0,012 °С до плюс 0,117 °С; расширенная неопределённость воспроизведения единицы при этом составляет от 0,124 °С до 0,139 °С.

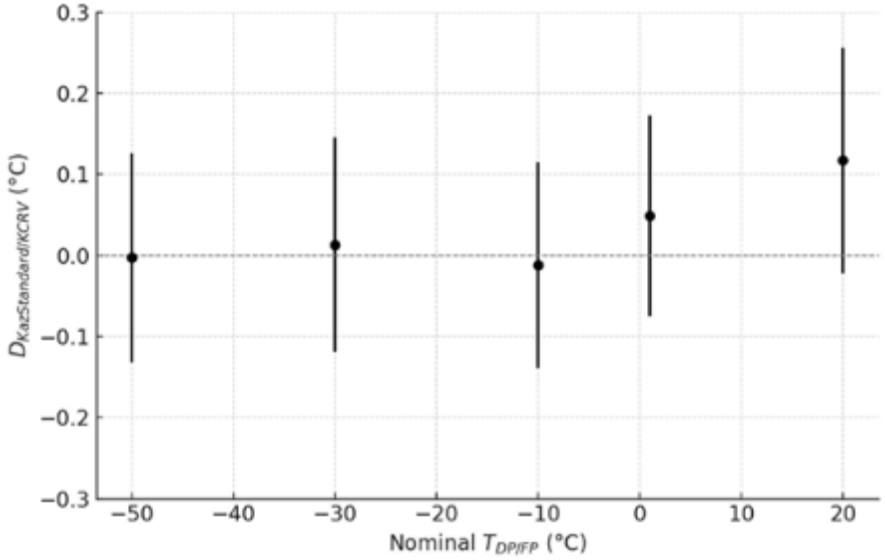


Рисунок 3.4 — Степень эквивалентности $D_{KazStandard/KCRV}$ между значениями температуры точки росы/инея, воспроизводимыми эталонным генератором РГП «КазСтандарт» $[T_{DP/FP}]_{KazStandard}$, и контрольными значениями ключевых сличений (KCRV) $[T_{DP/FP}]_{KCRV}$.

Выводы по главе 3

Итоги сличения свидетельствуют о высоком уровне согласия между реализациями влажностной шкалы в ВНИИФТРИ и КазСтандарте. Доминирующей составляющей суммарной неопределённости КазСтандарта является неполное насыщение газа (эффективность) в насытителе. Количественная оценка данной составляющей была затруднена ограниченной точностью имевшегося контрольного гигрометра с расширенной неопределённостью 0,2 °С. Дополнительные испытания при расходах 0,5 л/мин и 1 л/мин показали, что разность показаний в этих режимах не превышает 0,01 °С, поэтому при оценке неопределённости был принят пессимистический сценарий (наихудший случай). Результаты сличения подтвердили приемлемую эффективность насытителя; в дальнейшем значение $D_{KazStandard/KCRV}$ может использоваться в качестве составляющей неопределённости.

Результаты, полученные в результате сличения, были использованы в качестве доказательства возможностей КазСтандарта и послужили основой для публикации

соответствующих значений СМС в базе данных МБМВ. Результаты данного сличения опубликованы в [111].

Благодаря сличению с ВНИИФТРИ результаты КазСтандарта связаны с контрольными значениями ключевого сличения CCT-K6.

ГЛАВА 4. АКТУАЛИЗАЦИЯ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПОВЕРОЧНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВ

Модернизация Государственного эталона единицы температуры точки росы/инея, поступательное развитие измерительных технологий и приборостроения, а также расширение номенклатуры средств измерений влажности газов создали объективные предпосылки для пересмотра действующих национальных стандартов СТ РК 2.114-2006 и СТ РК 2.415-2016, устанавливающих требования к государственным эталонам и поверочным схемам в области измерений относительной влажности и температуры точки росы/инея газов соответственно.

В рамках актуализационных работ проведён структурный анализ метрологической иерархии передачи единиц относительной влажности, температуры точки росы/инея и объёмной (молярной) доли влаги от государственных эталонов к рабочим средствам измерений. Дополнительно выполнены расчёты оптимальных соотношений погрешностей между эталонными и поверяемыми средствами измерений для каждой ступени передачи единицы.

При изучении метрологических характеристик зарегистрированных средств измерений влажности газов и применяемых для их поверки эталонных устройств анализировались три основных параметра: область применения прибора, диапазон измерений и нормированный предел допускаемой погрешности.

Приоритетные направления актуализации государственной поверочной схемы определены на основании данных информационной системы технического регулирования «e-КТРМ» (раздел «Реестр государственной системы обеспечения единства измерений Республики Казахстан») [124] с учётом актуальных международных показателей в области измерений влажности газов и современных достижений в сфере измерительных технологий.

В таблице 4.1 приведены сведения о распределении типов средств измерений влажности газов в зависимости от назначения, установленного изготовителями.

Таблица 4.1 — Распределение количества типов средств измерений влажности газов в зависимости от назначения

Назначение средства измерений	Количество утверждённых типов
Измерение относительной влажности	165
Измерение объемной доли влаги	17
Измерение температуры точки росы/инея	25

На рисунке 4.1 представлены диаграммы распределения количества типов СИ в зависимости от предназначения

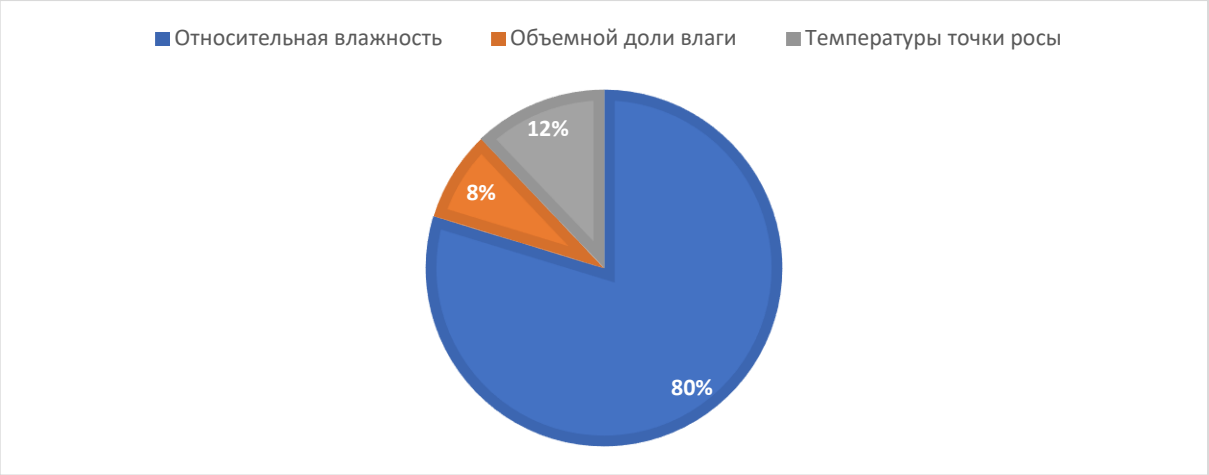


Рисунок 4.1 – Диаграмма распределения количества типов СИ в зависимости от предназначения

В таблице 4.2 представлено распределение типов средств измерений относительной влажности по группам в зависимости от пределов допускаемой абсолютной погрешности, нормированных изготовителями.

Таблица 4.2 — Распределение количества типов средств измерений относительной влажности в зависимости от пределов допускаемой абсолютной погрешности

Пределы допускаемой абсолютной погрешности средств измерений относительной влажности	Количество типов
от 0,5% до 1%	18
от 1% до 2%	32
от 2% до 3%	75
от 3% до 5%	10
от 5% до 10%	30

В таблице 4.3 представлено распределение типов средств измерений температуры точки росы/инея по группам в зависимости от пределов допускаемой абсолютной погрешности, нормированных изготовителями.

Таблица 4.3 — Распределение количества типов средств измерений температуры точки росы/инея в зависимости от пределов допускаемой абсолютной погрешности

Пределы допускаемой абсолютной погрешности средств измерений температуры точки росы/инея	Количество типов
от 0,2°С до 1°С	10
от 1°С до 2°С	15

В таблице 4.4 представлено распределение типов средств измерений объёмной доли влаги по группам в зависимости от пределов допускаемой приведённой погрешности, нормированных изготовителями.

Таблица 4.4 — Распределение количества типов средств измерений объёмной доли влаги в зависимости от пределов допускаемой приведённой погрешности

Пределы допускаемой приведенной погрешности средств измерений объемной доли влаги	Количество типов
от 2% до 6%	12
от 6% до 10%	5

На рисунках 4.2–4.4 приведены диаграммы, отражающие распределение количества типов средств измерений параметров влажности газов в зависимости от нормированных пределов допускаемой погрешности.

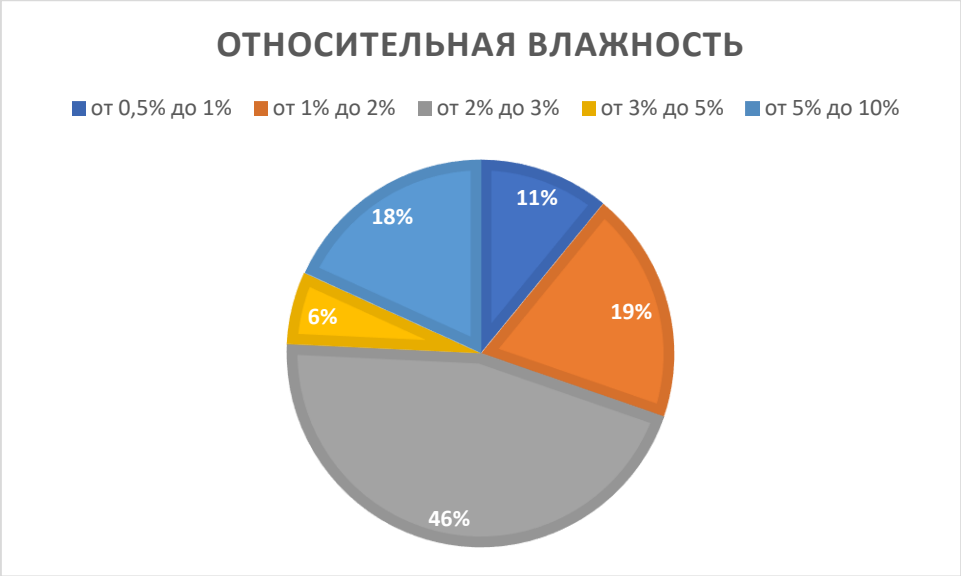


Рисунок 4.2 — Диаграмма распределения количества типов средств измерений относительной влажности в зависимости от нормированных пределов допускаемой погрешности

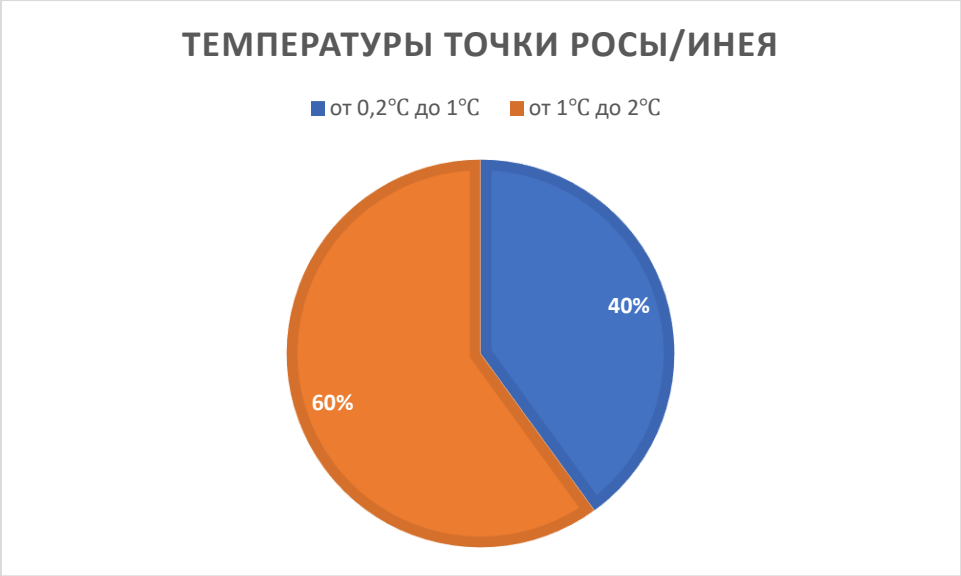


Рисунок 4.3 — Диаграмма распределения количества типов средств измерений температуры точки росы/инея в зависимости от нормированных пределов допускаемой погрешности



Рисунок 4.4 — Диаграмма распределения количества типов средств измерений объемной доли влаги в зависимости от нормированных пределов допускаемой погрешности

Анализ представленных диаграмм позволяет констатировать, что наибольший удельный вес в общей совокупности действующих средств измерений влажности газов — порядка 80 % — приходится на средства измерений относительной влажности, при этом свыше 60 % от их общего

числа характеризуются пределами допускаемой абсолютной погрешности, не превышающими 3 %.

Разработанный проект актуализированной Государственной поверочной схемы для средств измерений влажности газов имеет следующую структуру:

Метрологические характеристики Государственного первичного эталона температуры точки росы/инея и объемной (молярной) доли влаги:

- по температуры точки росы/инея: диапазон измерения от минус 50℃ до 20℃, неисключенная систематическая погрешность ±0,05℃ и среднеквадратичное отклонение 0,01℃ (при доверительной вероятности Р=95%);

- по объемной доли влаги: диапазон измерения от 63 млн$^{-1}$ до 22000 млн$^{-1}$, неисключенная систематическая погрешность от ±1,0% и среднеквадратичное отклонение 0,3% (при доверительной вероятности Р=95%).

Метрологические характеристики Государственного эталона единицы относительной влажности: диапазон измерения от 2% до 98%, неисключенная систематическая погрешность от 0,2% до 0,5% и среднеквадратичное отклонение 0,1% (при доверительной вероятности Р=95%).

На первой ступени передачи единицы температуры точки росы/инея и объемной доли влаги от разработанного Государственного первичного эталона единицы температуры точки росы/инея передается эталонам первого разряда, представляющие собой эталонные гигрометры методом прямых измерений и эталонные генераторы влажности методом сличений с помощью гигрометра-компаратора. Также единица температуры точки росы передается Государственному эталону единицы относительной влажности, в состав которых входят гигрометр точки росы с отдельным датчиком температуры. Передача единицы относительной влажности от Государственного эталона единицы относительной влажности передается эталонам первого разряда, представляющие собой эталонные гигрометры методом сличений с помощью гигрометра-компаратора и эталонные генераторы влажности методом прямых измерений.

В качестве рабочих эталонов первого разряда применяют генераторы влажного газа и гигрометры в диапазоне измерений:

- температуры точки росы/инея от минус 50 °С до плюс 20 °С;

- объемной доли влаги от 63 до 22000 млн$^{-1}$;

- относительной влажности газа от 2 % до 98 %.

Границы доверительных погрешностей рабочих эталонов первого разряда составляют:

- абсолютных погрешностей температуры точки росы/инея от 0,2 °С до 0,5 °С;

- относительных погрешностей объемной доли влаги от 1,5 % до 3,0 %;

- абсолютных погрешностей относительной влажности газа от 0,5 % до 1,0 %.

Рабочие эталоны первого разряда предназначены для поверки и калибровки эталонных генераторов влажного газа и рабочих эталонов второго разряда методом прямых измерений и методом непосредственного сличения.

В качестве рабочих эталонов второго разряда используются генераторы влажного газа и гигрометры в диапазоне измерений:

- температуры точки росы/инея от минус 50 °С до плюс 20 °С;
- объемной доли влаги от 63 до 22000 млн$^{-1}$;
- относительной влажности газа от 2 % до 98 %.

Границы доверительных погрешностей рабочих эталонов второго разряда составляют:

- абсолютных погрешностей температуры точки росы/инея от 0,6 °С до 1,5 °С;
- относительных погрешностей объемной доли влаги от 3 % до 6 %;
- абсолютных погрешностей относительной влажности газа от 1,5 % до 3,0 %.

Рабочие эталоны второго разряда применяют для поверки и калибровки рабочих средств измерений методами прямых измерений и методом непосредственного сличения.

В качестве рабочих эталонов первого и второго разрядов используются генераторы влажного газа, реализующие метод двух давлений, метод фазового равновесия и метод смешивания потоков, а также конденсационные, кулонометрические и ёмкостные гигрометры.

В качестве рабочих средств измерений используются гигрометры в диапазоне измерений:

- температуры точки росы/инея от минус 50 °С до плюс 20 °С;
- объемной доли влаги от 63 до 22000 млн$^{-1}$;
- относительной влажности газа от 2 % до 98 %.

Границы доверительных погрешностей рабочих средств измерений составляют:

- абсолютных погрешностей температуры точки росы/инея от 1,0 °С до 3,0 °С;
- относительных погрешностей объемной доли влаги от 3,0 % до 10,0 %;
- абсолютных погрешностей относительной влажности газа от 2,0 % до 25,0%.

В качестве рабочих средств измерений используются гигрометры следующих типов: конденсационные, кулонометрические, ёмкостные, психрометрические, волосяные, резистивные и электролитические.

Схема прослеживаемости единиц температуры точки росы/инея и объемной доли влаги приведены на рисунке 4.5, схема прослеживаемости единицы относительной влажности приведены на рисунке 4.6.

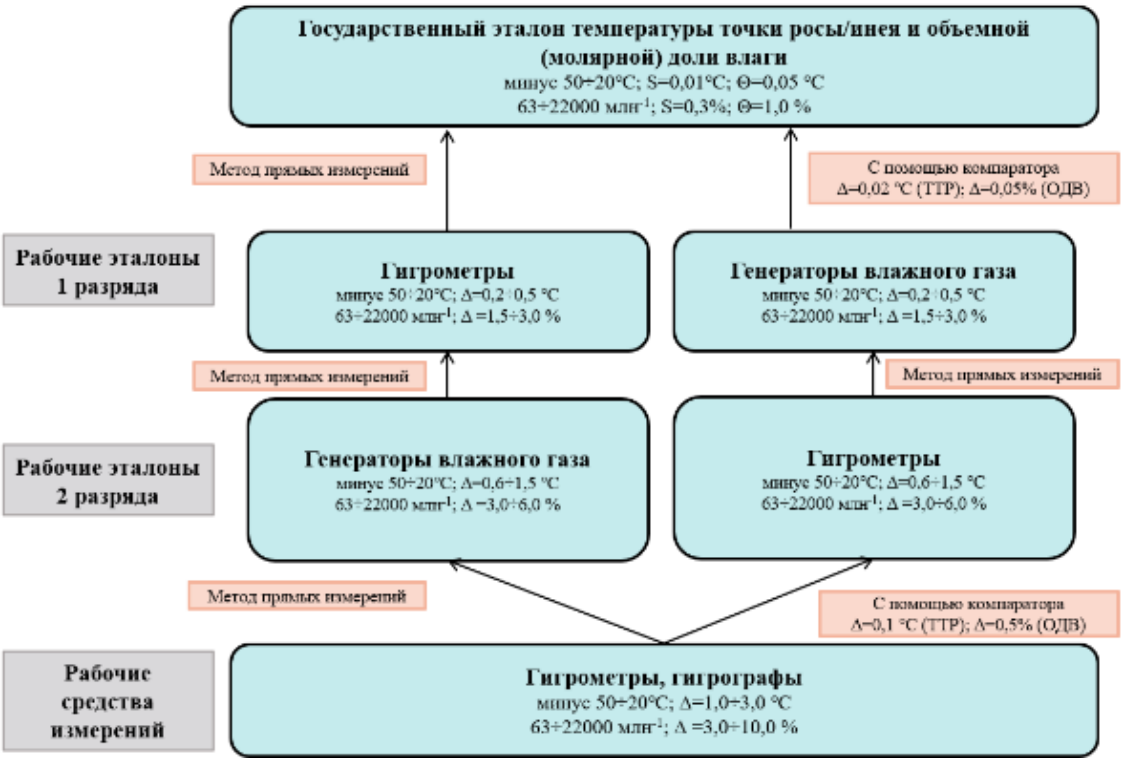


Рисунок 4.5 – Схема прослеживаемости единиц температуры точки росы/инея и объемной доли влаги



Рисунок 4.6 — Схема прослеживаемости единицы относительной влажности

Выводы по главе 4

В четвёртом разделе диссертационной работы выполнена актуализация Государственной поверочной схемы для средств измерений влажности газов в Республике Казахстан на основании результатов проведённых исследований по совершенствованию государственных эталонов влажности и итогов международных сличений COOMET.T-K6.1.

В проект актуализированной Государственной поверочной схемы внесены следующие принципиальные изменения: введена передача значений единицы объёмной доли влаги непосредственно от Государственного первичного эталона единицы температуры точки росы/инея; установлены рабочие эталоны первого и второго разрядов в области измерения объёмной доли влаги; обоснована метрологическая прослеживаемость Государственного эталона единицы относительной влажности к единице температуры точки росы/инея с использованием полученных в главе 2 коэффициентов чувствительности.

Актуализированная схема прослеживаемости единиц температуры точки росы/инея и объёмной доли влаги представлена на рисунке 4.5; актуализированная схема прослеживаемости единицы относительной влажности — на рисунке 4.6.

Внедрение актуализированной Государственной поверочной схемы обеспечит: повышение качества метрологического обеспечения единства измерений влажности газов в Республике Казахстан; гармонизацию национальной поверочной схемы с международной практикой передачи размера единиц влажности; расширение возможностей казахстанских аккредитованных лабораторий по обеспечению прослеживаемости рабочих средств измерений влажности к национальному первичному эталону.

Заключение

В рамках выполнения диссертационной работы реализован комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на совершенствование метрологического обеспечения измерений влажности газов в Республике Казахстан. По результатам диссертационного исследования получены следующие основные результаты.

1. Усовершенствован Государственный эталон единицы температуры точки росы/инея Республики Казахстан путём введения в его состав разработанного аппаратно-программного комплекса воспроизведения влажности воздуха на основе насытителя малого объёма. На конструкцию насытителя малого объёма получен патент Республики Казахстан на полезную модель KZ 9626 от 04.10.2024.

2. Разработана математическая модель преобразования единицы температуры точки росы/инея в единицы относительной влажности и объёмной доли влаги. Получены аналитические выражения для коэффициентов чувствительности (соотношения (2.25), (2.26), (2.30), (2.31)), позволяющие в каждом измерительном цикле в режиме реального времени пересчитывать неопределённости измерения температуры точки росы/инея в неопределённости воспроизводимых единиц влажности.

3. Разработана и реализована программная часть аппаратно-программного комплекса в среде NI LabVIEW, выполняющая автоматизированный сбор данных с электрических измерительных каналов, преобразование результатов прецизионных электрических измерений сопротивления платиновых термометров в значения единиц влажности по соотношениям главы 2 и автоматическое формирование протокола измерений с расширенной неопределённостью.

4. Применение разработанного аппаратно-программного комплекса в составе Государственного эталона температуры точки росы/инея Республики Казахстан обеспечивает снижение неопределённости воспроизведения единицы температуры точки росы/инея по составляющей типа А — в 10 раз, по составляющей типа В — на 42 % относительно показателей действующей поверочной схемы и паспорта эталона.

5. Измерительные возможности усовершенствованного Государственного эталона Республики Казахстан подтверждены в международных двусторонних ключевых сличениях COOMET.T-K6.1 с ФГУП «ВНИИФТРИ» (2024–2025 гг.). Во всех температурных точках сличения выполнен критерий эквивалентности $|E_n| < 1$. Полученные результаты сличения послужили документальным основанием для публикации измерительных и калибровочных возможностей (СМС) РГП «КазСтандарт» в базе данных KCDB Международного бюро мер и

весов. По итогам COOMET.T-K6.1 для РГП «КазСтандарт» опубликовано 6 СМС-строк в области воспроизведения температуры точки росы/инея.

6. Выполнена актуализация Государственной поверочной схемы для средств измерений влажности газов в Республике Казахстан: введена передача значений единицы объёмной доли влаги от Государственного первичного эталона температуры точки росы/инея; установлены рабочие эталоны первого и второго разрядов; обоснована прослеживаемость Государственного эталона относительной влажности к единице температуры точки росы/инея.

Совокупность полученных результатов представляет собой решение научно-технической задачи повышения точности воспроизведения единиц влажности воздуха в Республике Казахстан, имеющей существенное значение для развития метрологического обеспечения промышленности и сферы услуг.

Список сокращений и условных обозначений

СИ – средство измерений;

КТРМ – Комитет технического регулирования и метрологии;

РК – Республика Казахстан;

ГЭ – государственный эталон;

СТ РК – национальный стандарт Республики Казахстан;

SPRT – эталонный платиновый термометр сопротивления;

ОДВ – объёмная доля влаги;

НМИ – национальные метрологические институты;

АПК – аппаратно-программный комплекс;

МБМВ – Международное бюро мер и весов;

ССТ – Консультативного комитета по термометрии;

ПТС – платиновый термометр сопротивления;

СМС – измерительные и калибровочные возможности.

Список литературы

1. ГОСТ 8.547-2009 «ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений влажности газов».

2. СТ РК 2.114-2006 «Государственный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений относительной влажности газов».

3. СТ РК 2.415-2016 «Государственный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений температуры точки росы/инея газов».

4. Bell S. A. Validation of the NPL gravimetric hygrometer: dis. – City University London, 1995.

5. Lovell-Smith J. W. et al. Metrological challenges for measurements of key climatological observables. Part 4: atmospheric relative humidity //Metrologia. – 2015. – V. 53. – №. 1. – P. R40.

6. Visscher G. J. W. Humidity and moisture measurement //Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook. – CRC Press, 2017. – P. 80-1-80-13.

7. Meyer C. W. et al. A Second-Generation NIST Gravimetric Hygrometer. – 2010.

8. Sing K. S. W. Pioneers of Adsorption Science 2. Sidney John Gregg //Adsorption Science & Technology. – 2015. – V. 33. – №. 1. – P. 1-8.

9. Abd El-Galil D., Ahmed M. G. Consistency of the national realization of dew-point temperature using NIS standard humidity generators // International Journal of Metrology and Quality Engineering. – 2017. – V. 8. – P. 1.

10. Heinonen M. Uncertainty in humidity measurements: Publication of the EUROMET Workshop P758 // EUROMET Workshop P758. – Centre of Metrology and Accreditation (MIKES), 2006.

11. Oğuz Aytekin S. et al. A New Primary Dew-Point Generator at TUBITAK UME //International Journal of Thermophysics. – 2018. – T. 39. – C. 1-13.

12. Sairanen H. et al. Low-pressure and low-temperature dew/frost-point generator //International Journal of Thermophysics. – 2018. – T. 39. – №. 9. – C. 104.

13. Zvizdic D., Heinonen M., Sestan D. New primary dew-point generators at HMI/FSB-LPM in the Range from− 70° C to+ 60° C //International journal of thermophysics. – 2012. – T. 33. – C. 1536-1549.

14. Hudoklin D. et al. Design and validation of a new primary standard for calibration of the top-end humidity sensors //Measurement. – 2008. – T. 41. – №. 9. – C. 950-959.

15. Heinonen M. The CMA humidity standard // Measurement. – 1996. – V. 17. – №. 3. – P. 183-188.

16. Huang P. H. Determining Uncertainties of Relative Humidity, Dew/frost-point Temperature, and Mixing Ratio in a Humidity Standard Generator //Measurements. – 1998. – V. 5. – P. 7.

17. Buchczik D., Ilewicz W. Two-temperature humidity generator KW-2 // Optoelectronic and Electronic Sensors IV. – SPIE, 2001. – V. 4516. – P. 106-109.

18. Stevens M. Uncertainty evaluation of the relative humidity facility at NPL. – 1998.

19. Heinonen M. A humidity generator with a test chamber system //Measurement. – 1999. – T. 25. – №. 4. – C. 307-313.

20. Liedberg H. G., Mnguni M. R., Jonker D. A simple humidity generator for relative humidity calibrations//International Journal of Thermophysics. – 2008. – T. 29. – C. 1660-1667.

21. Ahmed M. G. et al. Realization of relative humidity scale using NIS two-temperature humidity generator //J. Phys. Sci. Appl. – 2014. – T. 4. – C. 484-487.

22. El-Din E., Mekawy M. M., Ali K. M. Realization of humidity standard facility using two-pressure humidity generator and humidity chamber // Metrology and Measurement Systems. – 2009. – V. 16. – №. 2. – P. 323-327.

23. Tistomo A. S., Achmadi A., Rifai I. A. Characterization of KIM LIPI's Relative Humidity Standard //Mapan. – 2014. – V. 29. – №. 1. – P. 51-55.

24. Ishiwata N., Niwa T., Abe H. Accurate and precise dew-point control system based on active pressure control in two-pressure humidity generator //Review of Scientific Instruments. – 2019. – V. 90. – №. 7. – P. 076104.

25. Abd El-Galil D. M., Mahmoud E. NIS two-pressure humidity generator //International Journal of Metrology and Quality Engineering. – 2016. – V. 7. – №. 3. – P. 303

26. Mahmoud E. E. D. Realization of relative humidity scale from 10% to 98% at 25°C // Mapan. – 2009. – V. 24. – №. 4. – P. 241-245

27. Heinonen M., Aytekin S. O., Uytun A. Bilateral comparison of humidity standards between UME and MIKES //International Journal of Thermophysics. – 2008. – T. 29. – C. 1678-1684.

28 Ekici C. AN APPLICATION FOR THE CALIBRATION OF THE TWO-PRESSURE HUMIDITY GENERATOR //Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering. – 2024. – T. 25. – №. 1. – C. 27-35.

29. Martins L. L. et al. Measurement uncertainty of dew-point temperature in a two-pressure humidity generator //International Journal of Thermophysics. – 2012. – T. 33. – C. 1568-1582.

30. Meyer C. W. et al. Performance and validation tests on the NIST hybrid humidity generator //International Journal of Thermophysics. – 2008. – V. 29. – P. 1606-1614.

31. Meyer C. W. et al. Design and performance of the new NIST hybrid humidity generator //NCSLI Measure. – 2009. – V. 4. – №. 2. – P. 28-36.

32. Meyer C. W. et al. Calibration of hygrometers with the hybrid humidity generator //NIST Special Publication. – 2008. – V. 250. – P. 250-83.

33. Meyer C. W. et al. Uncertainty budget for the NIST hybrid humidity generator //International Journal of Thermophysics. – 2012. – V. 33. – P. 1488-1499.

34. Bell S. A. Study of conceptual design for flow-mixing stage of low-range humidity standard generator. – 1999.

35. Chen L. H., Chen C. Uncertainly analysis of two types of humidity sensors by a humidity generator with a divided-flow system //Sensors. – 2018. – Т. 18. – №. 2. – С. 637.

36. Milošević N. D., Stepanić N., Babić M. A Relative Humidity Calibration from 5 Degrees C to 45 Degrees C in a Mixed-Flow Humidity Generator //Thermal Science. – 2012. – Т. 16. – №. 1. – С. 193-205.

37. Takahashi C., Kitano H. Calibration method of flow meters for a divided flow humidity generator //Sensors and Actuators B: Chemical. – 1996. – Т. 36. – №. 1-3. – С. 522-527.

38. Su P. G., Wu R. J. Uncertainty of humidity sensors testing by means of divided-flow generator //Measurement. – 2004. – Т. 36. – №. 1. – С. 21-27.

39. Vilbaste M. et al. The effect of water contamination on the dew-point temperature scale realization with humidity generators //Metrologia. – 2013. – Т. 50. – №. 4. – С. 329.

40. Gridnev A. S., Mandrokhlebov V. F. Salt-solution humidity generators //Measurement Techniques. – 1982. – Т. 25. – №. 9. – С. 772-776.

41. Lin Y. F. et al. The automatic calibration system of humidity fixed points at CMS //Measurement. – 1996. – Т. 19. – №. 2. – С. 65-71.

42. Yang L., Pabalan R. T., Juckett M. R. Deliquescence relative humidity measurements using an electrical conductivity method //Journal of Solution Chemistry. – 2006. – Т. 35. – №. 4. – С. 583-604.

43. Greenspan L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions //Journal of research of the National Bureau of Standards. Section A, Physics and chemistry. – 1977. – Т. 81. – №. 1. – С. 89.

44. ASTM E. Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solutions //ASTM designation E 104-85. – 1985. – С. 790-795.

45. Lu T., Chen C. Uncertainty evaluation of humidity sensors calibrated by saturated salt solutions //Measurement. – 2007. – Т. 40. – №. 6. – С. 591-599.

46. J. Grnblad, "Easy and reliable calibration with HMK15 humidity calibrator", *Vaisala News Mag.*, vol. 148, pp. 18-20, 1998.

47. Fraden J., Fraden J. Humidity and moisture sensors //Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. – 2016. – С. 507-523.

48. Jachowicz R. S., Makulski W. J. Optimal measurement procedures for a dew point hygrometer system //IEEE transactions on instrumentation and measurement. – 1993. – Т. 42. – №. 4. – С. 828-833.

49. Bae Y. K., Hyun D. H. Dew point measurement error due to tube length in a calibration instrumentation and the evaluation of measurement uncertainty //Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Т. 789. – С. 519-525.

50. Hudoklin D., Drnovšek J. The new LMK primary standard for dew-point sensor calibration: evaluation of the high-range saturator efficiency //International Journal of Thermophysics. – 2008. – Т. 29. – С. 1652-1659.

51. Lee C. Y., Lee G. B. Humidity sensors: a review //Sensor Letters. – 2005. – Т. 3. – №. 1-2. – С. 1-15.

52. Dario C. A method to obtain precise determinations of relative humidity using thin film capacitive sensors under normal or extreme humidity conditions //Journal of Cultural Heritage. – 2019. – Т. 37. – С. 166-169.

53. Korotcenkov G. Handbook of humidity measurement, volume 2: Electronic and electrical humidity sensors. – CRC Press, 2019.

54. Sokov I. A. Estimate of incompleteness error of moisture absorption in coulometric hygrometers //Measurement Techniques. – 2009. – Т. 52. – №. 12. – С. 1365-1371.

55. ГОСТ Р 8.811-2012 «Государственная система обеспечения единства измерений. Таблицы психрометрические. Построение, содержание, расчетные соотношения».

56. Harrison R. G., Wood C. R. Ventilation effects on humidity measurements in thermometer screens //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. – 2012. – Т. 138. – №. 665. – С. 1114-1120.

57. Chen J., Chen C. Uncertainty analysis in humidity measurements by the psychrometer method //Sensors. – 2017. – Т. 17. – №. 2. – С. 368.

58. Savage M. J., Cass A., De Jager J. M. Calibration of thermocouple hygrometers //Irrigation Science. – 1981. – Т. 2. – С. 113-125.

59. Kentved A. B., Heinonen M., Hudoklin D. Practical study of psychrometer calibrations //International Journal of Thermophysics. – 2012. – Т. 33. – С. 1408-1421.

60. Государственный эталон единицы относительной влажности (регистрационный номер KZ.01.01.00033-2007)// РГП на ПХВ «Казахстанский институт стандартизации и метрологии» Комитета технического регулирования и метрологии Министерства торговли и интеграции Республики Казахстан [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://www.ksm.kz/activities/metr/ge/detail.php?ID=105955 (дата обращения 13.06.2025).

61. Hardy B. ITS-90 formulations for vapor pressure, frostpoint temperature, dewpoint temperature, and enhancement factors in the range–100 to+ 100 C //The proceedings of the third international symposium on Humidity & Moisture, Teddington, London, England. – 1998. – С. 1-8.

62. Государственный эталон температуры точки росы/инея (регистрационный номер KZ.01.01.00062-2017)// РГП на ПХВ «Казахстанский институт стандартизации и метрологии» Комитета технического регулирования и метрологии Министерства торговли и интеграции Республики Казахстан [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://www.ksm.kz/activities/metr/ge/detail.php?ID=105956 (дата обращения 13.06.2025).

63. Zhumagali A. K. On the Modernization of State Gas Humidity Standards of the Republic of Kazakhstan, Kompetentnost'/Competency (Russia), 2024, no. 4 //DOI. – 2024. – Т. 10. – С. 1993-8780.

64. Жумагали А. К., Юрченко А. В. Обзор метрологических прослеживаемости средств измерений единицы относительной влажности //К57 Материалы V международного форума (24-25 ноября 2022 г.)/под ред. ВИ Сырямкина.–Томск: STT, 2023–145с. – 2002. – №. 1. – С. 41.

65. Жумагали А.К. Анализ государственных стандартов и эталонов измерений влажности газов в Республике Казахстан: текущее состояние и перспективы// SMART. – 2024. – №1 (87). – С.61-65.

66. Технический регламент Евразийского экономического союза ТР ЕАЭС 046/2018 «О безопасности газа горючего природного, подготовленного к транспортированию и (или) использованию».

67. СТ РК ГОСТ Р 53762-2011 «Газы горючие природные. Определение температуры точки росы по углеводородам».

68. СТ РК ИСО 23874-2011 «Газ природный. Требования к газовой хроматографии для расчета точки росы углеводорода».

69. СТ РК ИСО 6327-2004 «Анализ газов. Определение точки росы природного газа. Гигрометры с охлаждающей поверхностью».

70. СТ РК ИСО/ТО 12148-2011 «Газ природный. Калибровка инструментов типа охлажденного зеркала для определения точки росы углеводорода (образование жидкости)».

71. СТ РК ASTM D 1142-2022 «Стандартный метод испытания по определению водяных паров в газообразных топливах путем измерения температуры точки росы».

72. ГОСТ 20061-2021 «Газ природный. Определение температуры точки росы по углеводородам».

73. Zvizdic D., Heinonen M., Sestan D. Primary dew-point generation between 1 C and 60 C at LPM //20th IMEKO World Congress. – 2012. – С. 1790-1794.

74. ГОСТ Р ИСО 8573-1-2016 «Сжатый воздух. Часть 1. Загрязнения и классы чистоты».

75. PSD2 Pressure Swing Dryer User’s Manual//Michell Instruments [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://www.processsensing.com/docs/manual/PSD2-97031-Manual-v13-1.pdf (дата обращения 13.06.2025).

76. Генератор точки росы DG-4//Michell Instruments [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://www.bissistem.com/nem/files/Dew-Point%20Generators.pdf (дата обращения 13.06.2025).

77. Патент на полезную модель KZ 9626. Насытитель. Заявитель: Жумагали А.К.; опубл. 04.10.2024. Бюл. №40

78. Жидкостной термостат Fluke 7380// Fluke Corporation [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/7380____ugeng0000_Rebrand.pdf?VersionId=4H6QewhxLBf9iCeSmXVnDx_YJEhlj6ZL (дата обращения 13.06.2025).

79. Эталонный термометр сопротивления ЭТС-100//ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева», Россия [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/321944 (дата обращения 13.06.2025).

80. Эталонный платиновый термометр сопротивления Fluke 5699 // Fluke Corporation [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/5680-82-99ugeng0000.pdf?VersionId=r64WZ.LhbFDIS9JlEgFCMupD1GXJB9Em (дата обращения 13.06.2025).

81. ГОСТ 8.558-2009 «Государственная поверочная схема для средств измерений температуры».

82. Lachkov V. I., Lisenkov A. I. Standardization of the nominal static characteristics of a thermal converter //Measurement techniques. – 1999. – Т. 42. – №. 2. – С. 142-145.

83. Супер-термометр Fluke 1594A// Fluke Corporation [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/159X____ugeng0000.pdf?VersionId=6uAJezbKUfNaVxPAr3DHvNon7_IjL.m6 (дата обращения 13.06.2025).

84. Конденсационный гигрометр точки росы S8000 RS// Michell Instruments [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://www.processsensing.com/docs/manual/S8000_RS_MKIII_99999_EN_Manual.pdf (дата обращения 13.06.2025).

85. Барометр БОП-1М-2// Предприятие Барометр [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/332660 (дата обращения 13.06.2025).

86. Wexler A. Vapor pressure formulation for water in range 0 to 100 °C. A revision. Journal of Research of the National Bureau of Standards. Section–A. Physics and Chemistry. 1976;80A(5–6):775–785. https://doi.org.10.6028/JRES.080A.071.

87. Sonntag D. Advancements in the field of hygrometry. Meteorologische Zeitschrift. 1994;3(2):51–66. (In German) https://doi.org.10.1127/metz/3/1994/51.

88. Huang P. New equations for water vapour pressure in the temperature range -100 °C to 100 °C for use with the 1997 NIST/ASME steam tables. Proceedings of the 3rd International Symposium on Humidity and Moisture; Teddington: NPL, London. 1998, vol. 1, pp. 68–76.

89. Nielsen J. et al. Uncertainty in the generation of humidity //Measurement. – 2003. – С. 1-33.

90. Hyland R.W. A correlation for the second interaction virial coefficients and enhancement factors for moist air // Journal of Research of the National Bureau of Standards. Section-A. Physics and Chemistry. 1975, vol. 79A, no. 4, p. 551–560. https://doi.org.10.6028/JRES.079A.017.

91. Greenspan L. Functional equations for the enhancement factors for CO2-free moist air // Journal of Research of the National Bureau of Standards. Section-A. Physics and Chemistry 1976, vol. 80A, no. 1, p. 41–44. https://doi.org.10.6028/JRES.080A.007.

92. Lovell-Smith J. The propagation of uncertainty for humidity calculations // Metrologia. 2009, vol. 46, no. 6, p. 607–615. https://doi.org/10.1088/0026-1394/46/6/001.

93. ГОСТ 34100.3 «Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения».

94. Preston-Thomas H. et al. The International Temperature Scale of 1990(ITS-90) //metrologia. – 1990. – Т. 27. – №. 1. – С. 3-10.

95. Dinu C., Morosanu A. D., Neagu D. M. Aspects regarding the drift of platinum resistance sensors used as reference standards//Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VII. – SPIE, 2015. – Т. 9258. – С. 316-322.

96. D.R. White, C.L. Jongenelen, P. Saunders, The Hysteresis Characteristics of Some Industrial PRTs, Int. J. Thermophys. 31, p. 1676-1684, 2010.

97. Batagelj V., Bojkovski J., Drnovšek J. Methods of reducing the uncertainty of the self-heating correction of a standardplatinum resistance thermometer in temperature measurements of the highestaccuracy //Measurement science and technology. – 2003. – Т. 14. – №. 12. – С. 2151.

98. Pant U. et al. Evaluation of self-heating effect in platinum resistance thermometers //Measurement. – 2022. – Т. 203. – С. 111994.

99. Schurr J. et al. The ac quantum Hall effect as a primary standard of impedance //Metrologia. – 2006. – Т. 44. – №. 1. – С. 15.

100. СТ РК 2.19-2010 «Государственный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений электрического сопротивления».

101. Cordero R. R., Seckmeyer G., Labbe F. Effect of the resolution on the uncertainty evaluation //Metrologia. – 2006. – Т. 43. – №. 6. – С. L33.

102. Pearce J. V., Gray J., Veltcheva R. I. Characterisation of a selection of AC and DC resistance bridges for standard platinum resistance thermometry //International Journal of Thermophysics. – 2016. – Т. 37. – С. 1-14.

103. Drnovšek J., Bojkovski J., Pušnik I. General procedure for uncertainty evaluation of a temperature calibration bath //Instrumentation Science & Technology. – 2000. – Т. 28. – №. 5. – С. 413-420.

104. Alper F. M. P., Ince A. T., Aiordachioaiei M. Use of Salt Baths in the Temperature Range from 175° C to 540° C with Uncertainties of Less than 30 m° C //International Journal of Thermophysics. – 2011. – Т. 32. – С. 505-512.

105. Kitano H. et al. Saturator efficiency and uncertainty of NMIJ two-pressure two-temperature humidity generator //International Journal of Thermophysics. – 2008. – Т. 29. – С. 1615-1622.

106. Zvizdic D., Heinonen M., Sestan D. Investigation of Primary Dew-Point Saturator Efficiency in Two Different Thermal Environments //International journal of thermophysics. – 2015. – Т. 36. – С. 2215-2230.

107. Stevens M., Bell S. A. The NPL standard humidity generator: an analysis of uncertainty by validation of individual component performance //Measurement Science and Technology. – 1992. – Т. 3. – №. 10. – С. 943.

108. Heinonen M. Methods to investigate a dew-point temperature standard in an extended range //5th International Symposium on Humidity and Moisture. – 2006.

109. Oğuz Aytekin, S., Karaböce, N., Heinonen, M. et al. (2018). A New Primary Dew-Point Generator at TUBITAK UME. Int J Thermophys, 39, 62. https://doi.org/10.1007/s10765-018-2375-2.

110. Sairanen, H., Heinonen, M., Högström, R., Salminen, J., Saxholm, S., & Kajastie, H. (2018). Low-pressure and low- temperature dew/frost-point generator. International Journal of Thermophysics, 39(9), 104. https://doi.org/10.1007/s10765-018-2425-9.

111. Wettstein, S., & Mutter, D. (2018). Design and validation of the MBW standard humidity generators. International Journal of Thermophysics, 39(10), 116. https://doi.org/10.1007/s10765-018-2436-6.

112. Жумагали, А. К. Анализ оценки неопределенности гигрометра объемной доли влаги / А. К. Жумагали, Б. У. Байхожаева // Компетентность. – 2025. – № 1. – С. 37-41. – DOI 10.24412/1993-8780-2025-1-37-41. – EDN TTDKGK.

113. Жумагали, А. К. Анализ оценки неопределенности гигрометра относительной влажности, откалиброванного с помощью термометра и гигрометра точки росы / А. К. Жумагали, А. В. Юрченко, С. Б. Смагулов // Законодательная и прикладная метрология. – 2024. – № 2(188). – С. 33-38. – EDN DJHOYG.

114. Zhumagali A. K., Vinge M. A. Bilateral key comparisons of dew point temperature standards of national metrological institutes //Metrologia. – 2025. – Т. 62. – №. 1A. – С. 03002.

115. Bell S. et al. Final report on CCT-K6: Comparison of local realisations of dew-point temperature scales in the range− 50° C to+ 20° C //Metrologia. – 2015. – Т. 52. – №. 1A. – С. 03005-03005.

116. Meyer C. W., Hill K. D. Bilateral key comparison SIM.T-K6.1 on humidity standards in the dew/frost-point temperature range from -25 °C to +20 °C//Metrologia. – 2014. – Т. 51. – №. 1A. – С. 03002.

117. Huang P., Meyer C., D Brionizio J. Bilateral key comparison SIM. T-K6. 3 on humidity standards in the dew/frost-point temperature range from-30° C to 20° C //Metrologia. – 2015. – Т. 52. – №. 1A. – С. 03001-03001.

118. Brionizio J. D., Skabar J. G. Final report on SIM. T-K6. 4: Comparison of INMETRO and INTI humidity standards //Metrologia. – 2013. – Т. 50. – №. 1A. – С. 03010-03010.

119. Meyer C. W., Solano A. Bilateral key comparison SIM.T-K6.5 on humidity standards in the dew/frost-point temperature range from -30 °C to +20 °C//Metrologia. – 2016. – Т. 53. – №. 1A. – С. 03005.

120. Vinge M. A., Morozov S. A. State Primary Standard of Relative Humidity of Gases, Molar (Volume) Fraction of Moisture, Dew/Frost Point Temperature, Hydrocarbon Condensation Temperature Units Get 151-2020 //Measurement Techniques. – 2023. – Т. 65. – №. 10. – С. 703-711.

121. Dubovikov N. I. et al. The Russian national standard of gases humidity and traceability system of humidity measurements //International Journal of Thermophysics. – 2016. – Т. 37. – С. 1-12.

122. Vinge A. F. et al. National primary standard for the units of relative humidity of gases, molar (volume) fraction of moisture, and dew/frost point temperature, GET 151-2014 //Measurement Techniques. – 2016. – Т. 59. – №. 7. – С. 685-692.

123. Anashko A. A. et al. Metrological Capabilities of the National Primary Standard for the Units of Relative Humidity of Gases, Molar (Volume) Fraction of Moisture, and Temperature of the Dew/Frost Point, GET 151-2014 //Measurement Techniques. – 2017. – Т. 60. – №. 2. – С. 103-108.

124. Информационного системы технического регулирования «е – КТРМ»

125. Zhumagali A. et al. KazStandard Primary Dew/Frost Point Generator //Measurement Science Review. – 2025. – Т. 25. – №. 4. – С. 172-177.

126. Nielsen J., De Groot M. J. Revision and uncertainty evaluation of a primary dewpoint generator //Metrologia. – 2004. – Т. 41. – №. 3. – С. 167.

127. Bosma R., Nielsen J., Peruzzi A. Development of the high-temperature dew-point generator over the past 15 years //International Journal of Thermophysics. – 2017. – Т. 38. – №. 10. – С. 161.

128. Mitter H. New BEV/E+ E Elektronik low-frost-point/high-pressure generator //International Journal of Thermophysics. – 2015. – Т. 36. – №. 8. – С. 2242-2258.

129. Actis A. et al. Characterisation of the IMGC Frost Point Generator in the Temperature Range-75° C to 0° C //Proceedings of 7th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science (TEMPMEKO '99). – 1999. – Т. 1. – С. 185-190.

130. Actis A. et al. Metrological performances of the IMGC two-temperature primary humidity generator for the temperature range-15 C to 90 C //Proc. of 3rd International Symposium on Humidity and Moisture (ISHM 1998). – 1998. – Т. 1. – С. 2-9.

131. Scace G. E., Hodges J. T. Uncertainty of the NIST low frost-point humidity generator //Proceedings of TEMPMEKO. – 2001. – С. 597-602.

132. ГОСТ 6651-2009 «Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний».

Приложения А.

Титульный лист методики исследований государственного эталона температуры точки росы/инея и объемной (молярной) доли влаги

Республиканское государственное предприятие
на праве хозяйственного ведения
«Казахстанский институт стандартизации и метрологии»
Комитета технического регулирования и метрологии
Министерства торговли и интеграции Республики Казахстан

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель
генерального директора
РГП «КазСтандарт»
_____ Н. Хабиев
«03» 11 2025 г.

Государственный эталон единицы
температуры точки росы/инея и объемной (молярной) доли влаги

Методика исследования

РАЗРАБОТАНО:
Главный специалист
РГП «КазСтандарт»
_____ А. Жұмағали
«03» 11 2025 г.

г. Астана, 2025 г.

Приложение Б.

Акт об использовании результатов кандидатской диссертационной работы (РГП «КазСтандарт»)

РЕСПУБЛИКАНСКОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
НА ПРАВЕ ХОЗЯЙСТВЕННОГО ВЕДЕНИЯ
«КАЗАХСТАНСКИЙ ИНСТИТУТ СТАНДАРТИЗАЦИИ
И МЕТРОЛОГИИ»

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального директора
РГП «КазСтандарт»
_____ Хабиев Н.Е.
«07» 04 2026 г.

АКТ
о внедрении результатов
кандидатской диссертационной работы

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Жумагали Асылбек Кайратулы «Аппаратно-программный комплекс воспроизведения влажности воздуха на основе насытителя малого объёма», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, внедрены в Республиканском государственном предприятии «Казахстанский институт стандартизации и метрологии» (РГП «КазСтандарт»).

Внедрены следующие результаты:

- проведено совершенствование Государственного эталона единицы температуры точки росы/инея и объемной доли влаги в диапазоне значений от минус 50 °С до 20°С и от 63 млн$^{-1}$ до 23×10^{3} млн$^{-1}$;
- впервые разработан и исследованы метрологические характеристики насытителя малого объёма, работающий на основе метода реализации фазового равновесия;
- подтверждены калибровочные и измерительные возможности разработанного Государственного эталона, в рамках проведение регионального ключевого сличения COOMET.T-K6.1 и опубликованы 6 CMC-строк на базе BIPM KCDB;
- разработаны методики исследований Государственного эталона температуры точки росы/инея и объемной доли влаги;
- определены коэффициенты чувствительности входных величин моделях измерений, для преобразования единиц температуры точки росы/инея и температуры газа в единицу относительной влажности, единиц температуры точки росы/инея и давлений газа в единицу объемной доли влаги;
- разработан проект актуализованной Государственной поверочной схемы для средств измерений влажности газов, позволяющий повысить качество обеспечения единства измерений влажности газов в Республики Казахстан.

Приложение В.

Протокол измерений АПК первичного эталона влажности воздуха

ПРОТОКОЛ ИЗМЕРЕНИЙ
Аппаратно-программный комплекс первичного эталона влажности воздуха

1. Идентификация	
№ протокола	АПК-h-2026-004217
Дата и время измерения	23.05.2026 14:36:08
Эталон	Аппаратно-программный комплекс первичного эталона влажности воздуха
Версия ПО АПК	Main.vi · v. 2.4.1 · LabVIEW 2023 SP1
Оператор	Жумагали А.К.
Прослеживаемость	COOMET.T-K6.1
Условия в помещении	T = 23,0 °C ; P_atm = 101,326 кПа ; RH = 42 %
Режим работы насытителя	малый объём, T_ванны = −20 °C, расход 1,0 л/мин, выдержка 30 мин

2. Эталонные средства измерений (электрические измерительные каналы)

Наименование	Тип / модель	Заводской №	Серт. Калибровки	Действует до
Термометрический измеритель	Fluke 1594A	B99396	KZ.01.2026.198	28.04.2027
Эталонный термометр (насыт.)	ЭТС-100	08-191	KZ.01.2026.152	12.04.2027
Эталонный термометр (ванна)	Fluke 5699	1298	KZ.01.2026.153	12.04.2027
Барометр	БОП-1М-2	910368	KZ.01.2026.108	16.03.2027
Жидкостной термостат	Fluke 7380	A87409	не подлежит	—

3. Результаты прямых электрических измерений

Измеряемая величина	Канал / прибор	Значение	Ед. изм.	u (станд.)
Сопротивление R_s (термометр в насытителе)	Fluke 1594A · GPIB-22 · 4-провод. схема	91,978304	Ом	0,000120
Сопротивление R_v (термометр в ванне)	Fluke 1594A · GPIB-22 · 4-провод. схема	23,039975	Ом	0,000110
Атмосферное давление P	БОП-1М-2 · COM3 · 9600	101,326	кПа	0,015

4. Косвенные результаты — преобразование R → T по МТШ-90 и идентификация td

Величина	Источник / соотношение	Значение	Ед. изм.	u (станд.)
ts — температура потока в насытителе	из R_s по МТШ-90	-20,008	°C	0,003
tv — температура жидкостной ванны	из R_v по МТШ-90	-20,002	°C	0,003
td — температура точки росы/инея	по разделу 2.2 настоящей работы	-20,002	°C	0,005
t_ch — температура в камере отн. влажности	ПТС-эталон камеры	23,015	°C	0,012
e_w(td) — давление насыщения над льдом	формула Харди (2.5)	103,21	Па	—
e_w(t_ch) — давление насыщения над водой	формула Харди (2.4)	2812,04	Па	—
f(P, td) — коэф. эффективности	формулы (2.6)–(2.8)	1,0005	—	—
f(P, t_ch) — коэф. эффективности	формулы (2.6)–(2.8)	1,0004	—	—

5. Воспроизведённые единицы влажности (выход эталона)

Параметр	Модель	Значение	Ед. изм.	U (k = 2)
Относительная влажность h	по соотношению (2.22)	**4,463**	%	**0,100**
Объёмная (молярная) доля влаги x_w	по соотношению (2.27)	**1244,0**	млн⁻¹	**21,4**

6. Подписи

Измерение выполнил	Жумагали А.К.	_____
Руководитель лаборатории	_____	_____