**Мамонтов Георгий Малхазович. Разработка и исследование эталонного комплекса на основе метода фазового равновесия для воспроизведения и передачи размера единицы влагосодержания в чистых газах : диссертация ... кандидата технических наук : 05.11.15, 05.11.13.- Санкт-Петербург, 2002.- 134 с.: ил. РГБ ОД, 61 03-5/1773-2**

**МАМОНТОВ ГЕОРГИЙ МАЛХАЗОВИЧ**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭТАЛОННОГО КОМПЛЕКСА НА ОСНОВЕ МЕТОДА ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ РАЗМЕРА ЕДИНИЦЫ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ В ЧИСТЫХ ГАЗАХ**

Специальности:

05.11.15 «Метрология и метрологическое обеспечение» и 05.11.13 - «Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и

изделий»

**Диссертация**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

C:\Users\Pavel\AppData\Local\AppData\Local\Temp\FineReader11.00\media\image1.jpeg

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Конопелько Л.А.

Санкт-Петербург 2002 г.

**СОДЕРЖАНИЕ**

стр.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 5

[ВВЕДЕНИЕ 6](#bookmark1)

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР 11

1. Понятие «влажность газов» и характеристики влажности газов.. 11
2. [Существующие методы и передовые средства измерений влажности газов 13](#bookmark3)
3. [Существующие методы получения газа с заданной влажностью 18](#bookmark4)
4. Гравиметрический метод 19
5. [Метод двух давлений 20](#bookmark5)
6. [Метод двух температур 22](#bookmark6)
7. [Метод смешения потоков 24](#bookmark7)
8. [Метод насыщенных растворов солей 24](#bookmark8)
9. Система метрологического обеспечения в области гигрометрии 25
10. Табличная зависимость парциального давления насыщенного

пара от температуры 28

1. [Обоснование выбранного направления работы 30](#bookmark13)

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ 35

1. Теоретический анализ процессов тепло- и массообмена в парогазовом потоке 35
2. [Диаграмма процесса 36](#bookmark14)
3. [Режим вымораживания 36](#bookmark15)
4. [Режим насыщения 37](#bookmark16)
5. [Концентрация пара 40](#bookmark18)
6. [Подобие процессов тепло- массообмена 40](#bookmark19)
7. [Определение зависимости концентрации пара от температуры 44](#bookmark22)
8. Теоретический анализ эффекта пересыщения парогазовой

смеси 46

1. [Степень пересыщения смеси 47](#bookmark26)
2. [Критическое пересыщение 47](#bookmark27)
3. [Определение степени пересыщения смеси 48](#bookmark28)
4. [Снижение степени пересыщения 52](#bookmark29)
5. [Исследование влияния качества охлаждающей поверхности на условия достижения фазового равновесия 55](#bookmark30)
6. [Шероховатость инея 56](#bookmark31)
7. [Плотность и теплопроводность инея 57](#bookmark32)

[2.3.3. Определение толщины осаждённого слоя инея 57](#bookmark33)

1. [Развитие охлаждающей поверхности 58](#bookmark34)
2. [Выводы 60](#bookmark35)

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНЫХ РЕЖИМОВ ГЕНЕРАТОРА ВЛАЖНОСТИ 61

1. Принципиальная схема контура насыщения генератора влажности 61
2. [Математическая модель основного сатуратора 63](#bookmark36)
3. [Математическая модель предварительного сатуратора 65](#bookmark37)
4. [Моделирование температурно-влажностных режимов предварительного и основного сатураторов 68](#bookmark38)
5. Выводы 83

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА 1 'ИГРОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА 84

1. [Система подготовки газовой пробы 85](#bookmark39)
2. [Структурная схема генератора влажности 86](#bookmark40)
3. [Тепломассообменное устройство 87](#bookmark41)
4. [Термостатируемая рабочая камера 89](#bookmark42)

4.5. Выводы 91

ГЛАВА 5. АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ГИДРОМЕТРИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА 92

1. Определение составляющей погрешности вследствие

неполного насыщения парогазовой смеси 94

1. [Определение составляющей погрешности вследствие эффекта объёмной кристаллизации 98](#bookmark44)
2. Определение составляющей погрешности вследствие наличия уноса конденсированного слоя с поверхности конденсации сатуратора... 99
3. [Определение составляющей погрешности вследствие нестабильности поддержания температуры в термостатируемой камере генератора 100](#bookmark46)
4. [Определение составляющих погрешности вследствие нестабильности входных параметров гигрометрического комплекса 101](#bookmark47)
5. [Расчёт суммарной абсолютной погрешности воспроизведения температуры точки росы 101](#bookmark48)
6. [Выводы 105](#bookmark49)

[6. ПОДТВЕРЖДЕНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В МЕЖДУНАРОДНЫХ КЛЮЧЕВЫХ СЛИЧЕНИЯХ 106](#bookmark50)

1. [Метрологические характеристики эталонов влажности, эталона сравнения и схема сличений 107](#bookmark51)
2. Результаты сличений 109

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 111](#bookmark52)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 113](#bookmark53)

ПРИЛОЖЕНИЯ 123

**СПИСОК ПРИНЯТЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**

*G* - массовый расход парогазовой смеси; *і -* удельная энтальпия. *а -* коэффициент теплоотдачи;

*Т -* температура парогазовой смеси;

*Ts-* температура охлаждающей поверхности.

/? *-* коэффициент массоотдачи;

*С* - концентрация пара в смеси;

*Cs* - концентрация пара у поверхности охлаждения, р - плотность смеси

*СР -* теплоёмкость смеси при постоянном давлении;

*h* - удельная теплота сублимации льда.

*Nu* = —‘~, *NuD* = —- - критерий Нуссельта для передачи тепла и массы Я *D*

соответственно;

Рг = ; рГд = . критерий Прандтля для переноса тепла и массы

*Л р ■ D*

соответственно;

Re = ~~н~~ ~~‘^~~ *~~р~~ -* критерий Рейнольдса; *ft*

*A, I, m -* постоянные коэффициенты;

*X, /и, С, , D , w -* коэффициент теплопроводности, вязкость, теплоёмкость, коэффициент диффузии и скорость течения парогазовой смеси соответственно;

*d -* характерный размер охлаждающей поверхности. *а -* коэффициент температуропроводности смеси.

**ВВЕДЕНИЕ**

При проведении градуировки, первичной и периодической поверок высокоточных газоаналитических приборов необходимо применение особо чистых газов и эталонных газовых смесей с контролируемым содержанием влаги от 0,13 ppb до 0,5 ppm (соответствующем диапазону температур точки росы влаги от -120 до -80 °С).

Учитывая отсутствие до момента выполнения данной работы эталонных средств воспроизведения содержания влаги в особо чистых газах и эталонных газовых смесях с требуемой высокой точностью (с относительной погрешностью, не превышающей ± 5 %), а также отсутствие эталонных средств калибровки и обязательных первичной и периодической поверок высокоточных гигрометров, применяемых при контроле особо чистых азов и эталонных смесей, обеспечение качества производимой и контролируемой газовой продукции для метрологических нужд было невозможно. Это явилось обоснованием необходимости создания эталонного комплекса для воспроизведения и передачи размера единицы влагосодержания в газовых средах, позволяющего решить такие актуальные задачи как воспроизведение субмикроконцентраций влаги в диапазоне от 0,13 ppb до 0,5 ppm (соответствующем диапазону температур точки росы от -120 до -80 °С) в особо чистых газах и эталонных газовых смесях, проведения испытаний с целью утверждения типа, первичная и периодическая поверки и исследования метрологических характеристик высокоточных гигрометров, предназначенных для измерений содержания влаги в качестве примеси при производстве и контроле газовых смесей для метрологических задач.

Кроме того, существует ряд отраслей, таких как нефтегазовая промышленность, производство полупроводниковых элементов, авиационная и космическая техника, метеорология, где необходимо обеспечение высокой точности и достоверности измерений содержания влаги в газовых средах в

диапазоне менее 0,5 ppm (ниже -80 °С точки росы влаги). Получившие же широкое распространение импортные средства измерений влажности для данного диапазона, а также новейшие отечественные измерительные приборы также подлежат обязательным испытаниям с целью утверждения типа, первичным и периодическим поверкам, что может быть выполнено с применением разработанного эталонного комплекса.

Метрологические характеристики разработанного комплекса (диапазон воспроизведения молярной доли влаги от 0,13 ppb до 23000 ppm, пределы относительной погрешности воспроизведения молярной доли влаги от ±0,5 до ±3%, диапазон воспроизведения температуры точки росы влаги от -120 °С до +20 °С, пределы абсолютной погрешности воспроизведения температуры точки росы от ±0,09 до ±0,13 °С точки росы) обосновывают возможность создания на его основе Государственного первичного эталона единицы влагосодержания и Государственной поверочной схемы для средств измерений влагосодержания в данном диапазоне.

**Цель и основные задачи работы**

Целью данной работы является создание эталонного комплекса для воспроизведения и передачи размера единицы влагосодержания чистых газах. Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

* Исследование метода воспроизведения размера единицы влагосодержания;
* Построение математических моделей физических процессов, лежащих в основе метода воспроизведения размера единицы влагосодержания;
* Анализ основных источников погрешности воспроизведения температуры точки росы разработанным методом;
* Разработка элементов эталонного гигрометрического комплекса; разработка алгоритмов расчёта основных узлов комплекса на основе используемых математических моделей;
* Изготовление эталонного комплекса для воспроизведения и передачи единицы влагосодержания в чистых газах и экспериментальное исследование его метрологических характеристик;
* Подтверждение метрологических характеристик эталонного комплекса в межрегиональных и международных ключевых сличениях генераторов влажности.

**В работе использовались следующие методы исследований:**

* термодинамический анализ процессов тепло- и массообмена в условиях конденсации водяного пара с привлечением теории подобия;
* моделирование теплового режима тепломассообменных устройств;
* теоретический и экспериментальный анализ источников погрешностей;
* экспериментальные исследования разработанного высокоточного генератора;
* международные ключевые сличения генераторов влажности.

**Научная новизна результатов работы:**

* Усовершенствован существующий метод "фазового равновесия" воспроизведения единицы влагосодержания газов путём его дополнения адаптивным управлением основными термодинамическими параметрами фазового равновесия системы водяной пар - поверхность конденсации. Реализация разработанного апгоритма адаптивного управления основными термодинамическими параметрами фазового равновесия позволила повысить точность воспроизведения единицы влагосодержания, соответствующую пределам относительной погрешности от ±0,5 до ±3 % в диапазоне молярной доли влаги менее 0,5 ppm, а также пределам абсолютной погрешности воспроизведения температуры точки росы от ±0,09 до ±0,13 °С в диапазоне менее -80 °С точки росы.
* Уточнены математические модели физических процессов тепломассообмена в условиях конденсации субмикроконцентраций влаги, процесса объёмной кристаллизации водяного пара в парогазовом потоке, процесса формирования конденсированного слоя и процесса разрушения и уноса конденсированного слоя, лежащих в основе метода "фазового равновесия".
* Определены основные параметры элементов разработанного эталонного гигрометрического комплекса, предназначенные для использования в инженерных разработках;
* Разработаны методики расчёта составляющих погрешности эталонного гигрометрического комплекса.

**Практическая ценность и внедрение результатов работы:**

* Создан эталонный гигрометрический комплекс для воспроизведения и передачи размера единицы влагосодержания газовых средах, имеющий следующие метрологические характеристики: диапазон воспроизведения температуры точки росы влаги от -120 до +20 °С точки росы, абсолютная погрешность во всём диапазоне от ± 0,09 °С до ±0,13 °С точки росы.
* Проведены международные ключевые сличения разработанного эталонного гигрометрического комплекса с эталонами влажности ряда европейских стран в рамках проекта EUROMET 511. Полученные метрологические .характеристики подтверждены результатами сличений в соответствующем диапазоне температур точки росы.

Разработанный эталонный комплекс для воспроизведения и передачи единицы влагосодержания в диапазоне субмикроконцентраций влаги в газовых средах внедрён в ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в комплекс аппаратуры, входящей в состав Государственного Первичного Эталона молярной доли и массовой концентрации компонентов в газовых средах ГЭТ154-01.

**Основные научные результаты, выносимые на защиту:**

* Уточнённые математические модели физических процессов, лежащих в основе метода "фазового равновесия", используемого для воспроизведения и передачи размера единицы влагосодержания в диапазоне субмикроконцентраций влаги в газовых средах.
* Разработанный алгоритм адаптивного управления основными термодинамическими параметрами фазового равновесия системы водяной пар - поверхность конденсации.
* Разработанный эталонный комплекс и результаты его исследований.
* Методики теоретических и экспериментальных исследований метрологических характеристик разработанного эталонного комплекса.

Результаты международных ключевых сличений разработанного эталонного комплекса с эталонами влажности ряда европейских стран.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертации доложены на I Международной конференции «Международные и национальные аспекты экологического мониторинга». - Санкт-Петербург, 1997; XIV IMEKO World Congress - Tampere (Finland); 3rd International Symposium on Humidity and Moisture - Teddington (United Kingdom); TEMPMEKO Symposium - Berlin (Germany). Проведены сличения разработанного высокоточного генератора с эталонами семи европейских лабораторий в рамках международных ключевых сличений EUROMET Project 511.

Основное содержание диссертации опубликовано в 1 статье и 5 докладах на международных и региональных конференциях.

Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, выводов и изложена на 119 страницах машинописного текста, содержит 8 таблиц, 77 рисунков, список использованной литературы из 106 наименований.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Усовершенствован существующий метод "фазового равновесия"

воспроизведения единицы влагосодержания газов путём его дополнения адаптивным управлением основными термодинамическими параметрами фазового равновесия системы водяной пар - поверхность конденсации. Реализация разработанного алгоритма адаптивного управления

основными термодинамическими параметрами фазового равновесия в

методе "фазового равновесия" позволила повысить точность воспроизведения единицы влагосодержания, соответствующую погрешности от ±0,09 до ±0,13 °С точки росы в диапазоне концентраций влаги менее 0,5 ppm (менее -80 °С точки росы).

1. Уточнены математические модели физических процессов

тепломассообмена в условиях конденсации субмикроконцентраций влаги, процесса объёмной кристаллизации водяного пара в парогазовом потоке, процесса формирования конденсированного слоя и процесса разрушения и уноса конденсированного слоя, лежащих в основе метода "фазового равновесия".

1. Определены основные конструктивные параметры элементов разработанного эталонного гигрометрического комплекса.
2. Разработаны методики расчёта составляющих погрешности эталонного гигрометрического комплекса.
3. Создан эталонный гигрометрический комплекс для воспроизведения и передачи единицы влагосодержания в диапазоне субмикроконцентраций влаги в газовых средах, имеющий следующие метрологические характеристики: диапазон воспроизведения температуры точки росы влаги от -120 до +20 °С точки росы, абсолютная погрешность во всём диапазоне от ± 0,09 °С до ±0,13 °С точки росы.

Проведены международные ключевые сличения разработанного эталонного гигрометрического комплекса с эталонами влажности ряда европейских стран в рамках проекта EUROMET 511. Полученные метрологические характеристики подтверждены результатами сличений в соответствующем диапазоне температур точки росы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *A guide to the measurement of humidity* 1996 Institute of Measurement and Control, 68p
2. G. Wylie, D. K. Davies, W. A. Caw 1965 The basic process of the dew-point hygrometer, in: A. Wexler (ed.), *Humidity and Moisture. Measurement and Control in Science and Industry,* vol 1, N.Y., Reinhold Publishing Corp.

pp. 125-134.

1. R. S. Jachowicz 1993 Optimal measurement procedures for a dew point hygrometer system *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 42 pp.828-833.
2. R. F. Pragnell 1989 The modem condensation dewpoint hygrometer *Measurement and Control* 22, pp.74-77.
3. S. Lomperski, J. Order 1996 Dew-point measurements at high water’vapour pressure, *Meas. Sci. Technol.* 7, pp.742-745.
4. R. G. Wylie, T. Labs 1985 Accurate psychrometer coefficients for wet and ice- covered cylinders in laminar transverse air streams, in: *Moisture and Humidity. Measurement and Control in Science and Industry,* Washington, Instrument Society of America, pp. 37-56.
5. L. P. Harrison 1965 Some fundamental considerations regarding psychrometry, in:A. Wexler (ed.), *Humidity and Moisture. Measurement and Control in Science and Industry,* vol 111, New York, Reinhold Publishing Corp., pp.71- ЮЗ.
6. Hasegawa S 1986 National basis of accuracy in humidity measurements *ISA Transactions 25,* No.3, pp 15-24
7. *Bell S A 1998 Validation of the NPL primary gravimetric hygrometer, Proc. of the 3'd International Symposium on Humidity and Moisture (Teddington:*

*NPL),w*oil, pp20-27

1. С. Takahashi, Т. Inamatsu 1985 Construction of a gravimetric hygrometer, in: *Humidity and Moisture. Measurement and Control in Science and Industry,* vol. Ill, N.Y., Reinhold Publishing Corp., pp. 389-432

1 l.A.G. Forton, R.F. Pragnell 1985 Development of the primary gravimetric hygrometer for the UK national humidity standard facility,, in: *Moisture and Humidity. Measurement and Control in Science and Industry,* vol. Ill, Washington, Instrument Society of America pp. 79-90

1. L. Greenspan Low-frost-point humidity generator. // J. Of Research NBS. - 1973 - №5 - c.145.
2. Неіпопеп M 1999 National basis for traceability in humidity measurements, *Doctor of Technology Thesis* (Helsinki: Helsinki University of Technology), pp 4-6
3. *Mamontova L, Mamontov G 1998 Standard hygrometric equipment in Russia Proc. of the 3>d International Symposium on Humidity and Moisture (Teddington: NPL),vo\.\, pp 167-172*
4. K.F. Poulter, J.L. Hales, A.G. Forton, R.F. Pragnell 1986 The UK national humidity standard - Justification and Concept, ISA Transactions 25, pp. 9-13
5. R. Benyon, R.F. Pragnell 1998 Development of the Spanish national humidity standard facility, Proc. of the 3rd International Symposium on Humidity and Moisture ('Teddington: NPL),vol.l , pp 37-44
6. C. Takahashi, H. Kitano 1998 Uncertainty analysis and inter-laboratory comparison of divided flow humidity generators, in: *Papers and Abstracts from the Third International Symposium on Humidity and Moisture,* vol. 1, Teddington, National Physical Laboratory, pp. 111-118.
7. B. Cretinon 1998 The CETIAT standard humidity generator operating from - 60°C to +70°C in dew-point temperature, in: *Papers and Abstracts from the Third International Symposium on Humidity and Moisture,* vol. 1, Teddington, National Physical Laboratory, pp.45-52.
8. Г. Inamatsu, С. Takahashi 1985 Trial construction of a precision humidity generator, in: *Moisture and Humidity. Measurement and Control in Science and Industry,* Washington, Instrument Society of America, pp. 101-110.
9. A. Actis, M. Banfo, V. C. Femicola, R. Galleano, S. Merlo 1998 Metrological performances of the IMGC two-temperature primary humidity generator for the temperature range -15°C to 90°C, in: *Papers and Abstracts from the Third International Symposium on Humidity and Moisture,* vol. 1, Teddington, National Physical Laboratory, pp.2-9.
10. M. de Groot 1998 A standard for humidity on the basis of a recirculating dew- point generator, in: *Papers and Abstracts from the Third International Symposium on Humidity and Moisture,* vol. 1, Teddington, National Physical Laboratory, pp. 53-61.
11. M. Stevens 1999 The new NPL frost point generator, in: J. F. Dubbeldam, M. de Groot (ed.), *Abstracts of the T" International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science,* Delft, NMi Van Swinden Laboratorium, p.50.
12. Bird R B, Stewart W E, Lightfoot E N 1960 Transport Phenomena ( J. Wiley and Sons Inc., Dept, of Chem. Eng., New York)
13. Baehr H D, Stephan К 1998 *Heat and mass transfer* (Berlin: Springer)
14. Rohsenow W M, Hartnett J P, Ganic E N 1985 *Handbook of heat transfer fundamentals,* McGraw-Hill Book Company, New York

26.Incropera P, De Witt P 1981 *Fundamentals of heat and mass transfer*, (J. Wylie and Sons Inc.)

27.Sonntag D 1998 The history of formulations and measurements of saturation water vapour pressure, Proc. of the 3rd International Symposium on Humidity and Moisture (Teddington: NPL),vol.1 , pp 93-102

1. L. Greenspan 1975 Functional equations for the enhancements factors for C02- free moist air, *J. Res. NBS* 80A, pp 41-44
2. D. Sonntag 1990 Important new values of the physical constants of 1986, vapour pressure formulations based on the ITS-90 and psychrometer formulae, Z *Meteorol.* 70, pp. 340-344
3. P.H. Huang 1998 New equations for water vapour pressure in the temperature range -100 °С to 100 °С for use with the 1997 NIST/ASME steam tables, Proc. of the 3rd International Symposium on Humidity and Moisture (Teddington: NPL),vol.l , pp 68-76
4. B. Hardy 1998 ITS-90 Formulations for the water vapor pressure, frostpoint, temperature, dewpoint temperature and enhancement factors in the range -100 °С to 100 °С, Proc. of the 3rd International Symposium on Humidity and Moisture (Teddington: NPL),vol.l , pp 214-222
5. Visscher G J W , Schurer К 1998 The psychrometer coefficient: calculation versus calibration, Proc. of the 3rd International Symposium on Humidity and Moisture (Teddington: NPL),vol.l , pp 231-245

33.Sonntag D. Hygrometrie. Berlin: Akadimie - Verlag, - 1968. - p. 1086.

1. Threlkeld J L 1962 *Thermal environmental engineering* (Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N J), lbt Ed., ch. 10
2. Denton W H , Ward D E 1960 *Brit. Chem. Eng.,* **5** No.l pp 18-26
3. *Denton W H , Shaw B, Ward D E 1958 I. Purification of hydrogen before distillation Trans. Inst. Chem. Eng., v.36, No.3, pp 179-200*
4. Denton W H , Shaw B, Gayler R, Seager P 1959 II. Purification of hydrogen before distillation Trans. Inst. Chem. Eng., v.37, No.5, pp 277-288
5. Barnard A J 1953 The theory of condensation of supersaturated vapours in the absence of ions, Proc. Roy. Soc. (London) **A220,** No.l 140
6. Hirth J P , Pound G M 1963 Condensation and evaporation nucleation and growth kinetics (Oxford: Pergamon Press)
7. Epstain M, Rosner D E 1970 Enhancement of diffusion-limited vaporization rates by condensation within the thermal boundary layer. 2. Comparison of homogeneous nucleation theory with the critical supersaturation model Int. J. Heat Mass Transfer **13**, pp 1393-1412
8. Frenkel F 1946 *Kinetic theory of liquids,* (Oxford: Clarendon Press)
9. Becker R, Dering W. 1935 Ann. Phys. **24**
10. Davies С N 1964 *Recent Advances in Aerosol Research* (Oxford: Pergamon Press)
11. Aoki K, Takayama K, Hayashi Y, Adachi S 1979 *A study on frost deposition (A theory of frost layer growth),* Trans. ASME, series B, vol.**45,** No. 394, pp 869- 876
12. Hayashi Y, Aoki К 1980 *Frost formation and its melting,* Refrigeration, Japan, vol.55, No.632, pp 473-482
13. *Yamada O, Tajima O, Hosoi T 1977 Heat mass transfer by forced convection under frosting conditions (single cooled plate and two opposed cooled plates), Refrigeration, Japan, vol.* ***52,*** *No.598, pp 729-737*
14. Fuks N 1961 *Advances in aerosol mechanics* (Moscow: USSR Academy of Science)
15. Denton W H , Ward D E 1960 *Brit. Chem. Eng.* 5 No.l
16. Farly F.J. Proc.Roy.Soc. (London), A 212 (1952)
17. Mamontov G 2000 Application of the phase equilibrium method for generation of-100 °С of humid gas frost-point temperature *Meas. Sci. Technol.* **11** pp 818-827
18. International Organisation for Standardisation 1993 *Guide to the expression of uncertainty in measurement,* International Organisation for Standardisation (Geneva)
19. Lowell-Smith J 2000 *Uncertainty Analysis for Humidity Generators* Measurement Standards Laboratory (Wellington, New Zealand)
20. List R.Y., Smithsonian Meteorological Tables. Wachington: D.C. Smithosonian Institution, - 1958. - p.332
21. Mamontov G 1997 Elaboration and investigation of the equipment for graduation of hygrometers in the range of low temperatures // XIV IMEKO World Congress - Tampere (Finland), pp. 216-221
22. Mamontov G, Mamontova D, Konopelko L 2000 Realisation of the phase equilibrium method in the standard low frost-point humidity generator // XV IMEKO World Congress - Wien (Austria), pp. 216-221.
23. C. Takahashi, H. Kitano, N. Ochi Uncertainty and performance of the NRLM two-pressure and two-temperature humidity generator. The 7th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, I-З June 1999, Delft, The Netherlands.
24. E. C. Morris 1997 A simple frost-point humidity generator, *Meas. Sci. Technol.* 8, pp.473-478.
25. R. Benyon, P. Huang 1998 A comparison of INTA and NIST humidity standard generators, in: *Papers and Abstracts from the Third International Symposium on Humidity and Moisture,* vol. 1, Teddington, National Physical Laboratory, pp.28-36.
26. M. Heinonen, Comparison of humidity standards at seven European national standards laboratories, *Metrologia* (в печати).
27. Мамонтова Л.Д., Мамонтов Г.М. Измерение Влажности в Решении Проблем Защиты Окружающей Среды // I Международная конференция «Международные и национальные аспекты экологического

мониторинга». - Санкт-Петербург, 1997, с.172-173.

1. Мамонтов Г.М., Конопелько Л.А., Пеклер В.В. Мониторинг влагосодержания атмосферы Арктики // III Международная конференция ЭКОБАЛТИКА'2000,- Санкт-Петербург, 2000, с. 131-136
2. Берлинер М.А. Измерение влажности. М.: Энергия, - 1973. - 400с.
3. ГОСТ 8.221-76 Влагометрия и гигрометрия (Основные понятия). М:. Из- во стандартов, - 1976. - 4с.
4. Зайцев В.А., Ледохович А.А. Влажность воздуха и ее измерения. Л.: Гидрометеоиздат, - 1974. - с. 17.
5. Берлинер М.А. Задачи и тенденции развития гигрометрии. // Измерительная техника. - 1982. - № 9.- с.44.
6. Психрометрические таблицы. М.: Гидрометеоиздат, - 1981. - 125с.
7. Спенсер-Грегори К., Роурке Е. Гигрометрия. М:. Металлургиздат, - 1963 г., 204 с.
8. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. М:. Из-во стандартов, - 1975.- 256с.
9. Матвеев Л. Основы метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоиздат, 1965 г.
10. ГОСТ 8.547-86 Государственный первичный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений относительной влажности газов. М:. Из-во стандартов, - 1986. - 4с.
11. Кузнецов В.А. Ялунина Г.В. Основы метрологии. М.: Из-во стандартов, - 1995. -279с.
12. Гриднев А.С., Мандрахлебов В.Ф. Солевые генераторы влажного воздуха. // Измерительная техника. - 1982. - №9. - с.59.
13. Гриднев А.С. Переходные процессы в установке для определения динамических характеристик гигрометров. В сб.: Материалы Всесоюзного научно-технического совещания "Аналитическое приборостроение, методы и приборы для анализа жидких сред". Тбилиси. - 1975. - т.2. - с.59.
14. Белошицкий А.П., Симулик М.Д. Образцовый генератор влажности газов на принципе двух давлений. В сб.: Материалы Всесоюзного научно- технического совещания "Аналитическое приборостроение, методы и приборы для анализа жидких сред". Тбилиси. - 1975. - т.2. - с.145.
15. Соков И.А., Жилинский А.А., Белошицкий А.П., Сатыр Т.А. Образцовый генератор влажного газа "Родник-2ВК". //Измерительная техника. - 1982.

- №9. - с.63.

1. Дубовиков Н.И., Подмирная О.А., Соков И.А. Погрешность генератора влажного газа на методе двух давлений. // Измерительная техника. - 1985. - №7. - с.55.
2. Меркулов А.П., Колышев Н.Д., Соков И.А. Аттестация образцового динамического генератора влажного газа "Полюс-2". // Измерительная техника. - 1982. - №9. - с.65.
3. Мчелидзе Л.Д. Установка для контроля и создания влажности парогазовых смесей в диапазоне микроконцентраций: Дис. канд. техн. наук: Л. - 1984. - 130 с.
4. Инамацу Т., Такахаси Т. Изготовление прецизионного генератора влажности. // Ое буцури. - 1984 - т.53 - №3 - с.249.
5. Бегунов А.А., Качкачишвили Л.Д., Матвеев Л.Т. О давлении насыщенного водяного пара. // Метрология и гидрология. - 1978. - №2. - с.101.
6. Дубовиков Н.И., Дозорцев А.Р., Подмурная О.А., Фридзон М.Ф. Анализ погрешностей методов получения газа с заданной влажностью. // Измерительная техника. - 1986. - №3. - с.33.
7. Бенгард Ф. Установка для определения статических и динамических характеристик гигрометров. // Измерительная техника. - 1970. - №2,- с.30.
8. Михеев М.А. Основы теплопередачи. М.: Энергоиздат, 1981 г., 417 с.
9. Исаченко В. Теплоотдача при конденсации. М.: Энергия, 1977 г.
10. Исаченко В. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981 г.
11. Амелин А. Теоретические основы образования тумана при конденсации пара. М.: Химия, 1966 г.
12. Васюнина Г., Аксельрод Л. Вымораживание влаги и диоксида углерода в трубчатых теплообменниках. Труды ВНИИКИМАШ, 1961 г.,т.4
13. Напалков Г. Н. Тепломассопередача в условиях образования инея. М.: Машиностроение, 1983 г., 190 с.
14. Воронец Д., Козич Д. Влажный воздух, термодинамические свойства и применение. М:. Энергоатомиздат. - 1984 - 124 с.
15. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейдлин А.Е., Техническая термодинамика. М.: Из-во Наука. - 1979 - 510с.
16. Радушкевич Л.Д. Курс термодинамики. М.: Просвещение. - 1971 - 288с.
17. Харисон Л.П. Неидеальные газы. В кн.: Влажность JL: Гидрометеоиздат, - 1969. -Т.З.-С.128.
18. Варгафтик Н. Теплофизические свойства газов и жидкостей. М.: Наука, 1972 г.
19. Вукалович М.П. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: Издательство стандартов. - 1969 - 377с.
20. Сидоров А.И., Шумяцкий Ю.И. Адсорбционная осушка газов. М.: Стройиздат, - 1972. - 140с.
21. Сыщиков В.И. Сорбционные осушители воздуха. JL: Стройиздат, - 1969. - 210с.
22. Мак-Адамс В.Х. Теплопередача. М.: Металлургиздат, - 1961. - 290с.
23. Богданов В.В., Христофоров Е.И., Клоцунг Б.А. Эффективные малообъемные смесители. Л.: Химия, - 1989. - 223с.
24. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета. Л.: Химия, - 1984.-336с.
25. Вукалович М.П. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. М.: Энергия, - 1963. - 383с.
26. Свойства влажного воздуха при давлениях 500-1000 мм.рт.ст (таблицы и диаграммы). М.: Госгортехиздат, - 1963. - 131с.
27. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.: Физматгиз, - 1959. - 699с.
28. Вулис Л.А. Термодинамика газовых потоков. М.: Госэнергоиздат, - 1950. - с.125
29. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат, - 1990. - с. 188.
30. Долинслий Е.Ф. Обработка результатов измерений. М.: Из-во стандартов, - 1973. - 190с.
31. МИ 2083-90 ГСИ. Измерение косвенные. Определение результатов измерения и оценивание их погрешностей. М:. Изд-во стандартов, - 1991. - 9с.
32. Бегунов А.А. Поверочные схемы для гигрометров // Измерительная техника. - 1979. - №3.- с.50.
33. Бегунов А.А. Принципиальные основы метрологического надзора за приборами для измерения влажности газов. // Метрология - 1975 - №5- с.16.
34. Бегунов А.А. Теоретические основы и технические средства гигрометрии: Метрологические аспекты. М.: Из-во стандартов, - 1988. - 350с.