

На правах рукописи



Голобоков Максим Викторович

Повышение достоверности метрологического контроля
инфракрасных пирометров и тепловизоров

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий».

Научный руководитель – **Данилевич Сергей Борисович**, доктор технических наук, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Походун Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», руководитель отдела госэталонов и научных исследований в области термодинамики.

Бродников Александр Федорович, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук, научный сотрудник лаборатории № 8-2.

Ведущая организация – Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», г. Москва.

Защита состоится «02» декабря 2020 г. в 16:00 часов в зале заседания диссертационного совета на заседании диссертационного совета Д.212.178.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет» по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Главный корпус, П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет» и на сайте <https://omgtu.ru>

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.178.01. Тел.: (3812) 65-24-79; e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru

Автореферат разослан «__» сентября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д.212.178.01
кандидат технических наук, доцент

С. А. Завьялов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Выполнение метрологического контроля неизбежно сопровождается риском ошибочного признания годным заведомо негодного средства измерений (СИ) или негодным заведомо годного СИ. При контроле пирометров и тепловизоров эти риски вызваны: неопределенностью воспроизведения температуры моделью абсолютно черного тела (АЧТ); вариативностью параметров окружающей среды; изменением апертуры АЧТ.

Актуальность выбранной темы обусловлена требованиями концепции риск-ориентированного мышления, принятой в ГОСТ 17025-2019 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий», требованиями «Стратегии развития в области обеспечения единства измерений до 2025 г.» в части разработки наиболее эффективных методик поверки, обеспечивающих высокую достоверность результатов при приемлемых затратах, отсутствием в существующих методиках поверки пирометров и тепловизоров показателей достоверности результатов поверки.

Степень разработанности темы исследования. Фундаментальными в области неконтактного измерения температуры являются работы Брамсона М. А., Siegel R., Howell J., Gaussorgues G. Методы теплового контроля рассматриваются в работах Вавилова В. П., Нестерук Д. А. Расчет излучающей способности моделей АЧТ рассмотрен в работах Пелецкого В. Э., Прохорова А. В., Саприцкого В. И., Русина С. П., Hanssen L. M. Исследованию молекулярного поглощения инфракрасного излучения в атмосфере посвящены работы Баранова Ю. И., Зуева В. Е., Тимофеева Ю. М., Clough S. A., Tennyson J. и др. В работах Захаренко В. А., Ионова Б. П., Матвеева М. С., Dudzik S., Liebmann F., Minkina W. освещены вопросы применения пирометров и тепловизоров, рассмотрены источники неопределенности измерений. Проблемы обеспечения достоверности результатов допускового контроля рассмотрены в работах: Кашлакова В. М., Розно М. И., Рубичева Н. А., Фрумкина В. Д., Данилевича С. Б. и др.

Перечисленные вопросы требуют обобщения и внедрения в практику при оценке качества существующих и разработке новых эффективных методик поверки пирометров и тепловизоров.

Основная идея работы заключается в анализе факторов, влияющих на достоверность поверки, поиске способов минимизации или исключения их влияния.

Цели и задачи исследования. Целью работы является повышение достоверности результатов поверки инфракрасных пирометров и тепловизоров, исследование и разработка методов и средств их метрологического обеспечения.

Поставленная цель потребовала решения следующих *задач*:

- исследование влияния температуры АЧТ на результаты определения показателя визирования пирометров;
- исследование влияния пропускания атмосферы на достоверность результатов поверки;
- исследование влияния эффекта размера источника (ЭРИ) на достоверность результатов поверки;
- оценка достоверности результатов поверки пирометров и тепловизоров;

- разработка и исследование специализированных моделей АЧТ;
- разработка и верификация специализированного программного обеспечения (ПО) для обработки результатов метрологического контроля пирометров и тепловизоров.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- впервые построены статистические модели погрешности пирометров Testo, Sight, АКИП, тепловизоров Testo, Flir, на основе которых выполнена оценка достоверности результатов поверки;
- получена численная оценка влияния пропускания атмосферы на результаты поверки пирометров и тепловизоров;
- обоснована необходимость нормирования в методиках поверки расстояния до эталонного АЧТ и его апертуры, а при определении показателя визирования пирометров – задания температуры АЧТ.

Теоретическая значимость работы заключается в следующем:

- обоснована целесообразность применения для оценки достоверности результатов поверки показателей, применяемых в теории допускового контроля;
- обоснована необходимость учета влияния пропускания атмосферы при поверке пирометров и тепловизоров;
- предложена формула позволяющая найти температуру АЧТ при которой следует определять показатель визирования в соответствии с действующими методиками поверки;
- обоснована возможность уменьшения на (20–25) % числа точек контроля пирометров и тепловизоров.

Практическая значимость работы:

- оценена достоверность результатов поверки пирометров и тепловизоров по действующим методикам. Выявлено, что при использовании ряда методик вероятность ошибки контроля 1-го рода достигает 23 %;
- разработаны, изготовлены и исследованы специализированные модели АЧТ, повышающие не менее чем в три раза точность воспроизведения температуры, что позволяет снизить вероятность ошибок контроля до (2–6) % и повысить достоверность результатов поверки в 2–4 раза;
- обоснованы требования к апертуре АЧТ и расстоянию до поверяемого пирометра и тепловизора;
- разработаны новые методики калибровки пирометров, тепловизоров, моделей АЧТ;
- разработано и аттестовано специализированное ПО для обработки результатов измерений при поверке и калибровке пирометров и тепловизоров.

Объектом исследования являются инфракрасные пирометры и тепловизоры, чувствительные в спектральном диапазоне (5–14) мкм (далее пирометры и тепловизоры), *предметом исследования* – методы и средства их метрологического контроля (поверки и калибровки).

Методология и методы исследования. Исследования выполнены на основе положений теории вероятностей, законов теплового излучения, методов полинейного счета «line-by-line» поглощения излучения, с применением методов моделирования на ЭВМ.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

- в методиках поверки следует нормировать температуру АЧТ при определении показателя визирования пирометра;
- использование при поверке тепловизоров Testo АЧТ с различной апертурой до 5 раз увеличивает вероятность ошибки контроля 1-го рода;
- приведение результатов измерений пирометрами чувствительными в диапазоне (5 – 14) мкм к номинальным значениям влияющих величин позволяет повысить достоверность поверки в 1,5 – 2 раза;
- вероятность ошибок контроля при поверке пирометров Testo, Sight, АКИП, тепловизоров Testo, Flir с применением АЧТ 1-го разряда составляет от 5 до 23 %, использование разработанных моделей АЧТ позволяет повысить достоверность поверки в 2–4 раза.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационное исследование по содержанию и характеру полученных результатов соответствует следующей области исследования: 5 – Разработка метрологического обеспечения приборов и средств контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, оптимизация метрологических характеристик приборов паспорта научной специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России по техническим наукам.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов исследований подтверждена:

- результатами экспериментов при поверке пирометров и тепловизоров;
- аттестатом аккредитации ФБУ «Новосибирский ЦСМ» № RA.RU.312480, пункты области аккредитации: «Пирометры частичного излучения, в том числе с унифицированными выходными сигналами», «Тепловизоры», «Излучатели в виде модели «Абсолютно – черное тело»;
- сертификатом соответствия № RU.01.2242 программного обеспечения;
- адекватностью теоретических моделей и их согласием с результатами проведенных экспериментальных исследований.

Результаты исследований докладывались и обсуждались на XIII Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2016), Новосибирск (2016 г.), II Всероссийской научно-технической конференции «Метрология, стандартизация, управление качеством», Омск (2017 г.), Международной научно-технической конференции «Метрология, стандартизация, качество: теория и практика», Омск (2017 г.), XI Всероссийской научно-практической конференции AS'2017 «Системы автоматизации в образовании, науки и производстве», Новокузнецк (2017 г.), 16-м учебно-методическом семинаре-совещании, проводимом НПП «Эталон», Омск (2018 г.), XIV Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП-2018), Новосибирск (2018 г.).

Результаты работы апробированы и использованы:

- в текущей производственной деятельности ФБУ «Новосибирский ЦСМ»;

– в учебном процессе в Новосибирском филиале ФГАОУ ДПО «Академия стандартизации, метрологии и сертификации» и ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий».

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в 17 научных статьях, семь из которых – в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, а две – в журналах, входящих в международную реферативную базу данных Scopus и систему цитирования Web of Science.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 205 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 168 наименований, содержит 47 таблиц, 46 рисунков, два приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, отражена степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены положения, выносимые на защиту.

В первом разделе рассматривается сущность теплового контроля, технические характеристики пирометров и тепловизоров, существующие критерии достоверности поверки.

Анализ критериев достоверности предложенных в МИ 187-86 и используемых при разработке методик поверки свидетельствует о их недостаточной информативности при оценке достоверности уже выполненных поверок. В частности, оценка максимальной вероятности P_{bam} ошибочного признания негодного СИ годным имеет смысл только для однозначных или многозначных мер. Для СИ с непрерывной измерительной функцией P_{bam} всегда равна единице. Наибольшая вероятность P_{grm} ошибочного признания негодным любого в действительности годного СИ зависит от контрольного допуска β , выбор которого никак не обоснован. При $\beta = 1$ значение P_{grm} будет заведомо равно $1 - P_{bam}$ и не несет информативной нагрузки. В свете внедрения концепции риск-ориентированного мышления представляется целесообразным использование критериев применяемых в теории допускового контроля: риск производителя и заказчика, вероятность ошибок контроля 1-го и 2-го рода, и позволяющих оценить риски всех субъектов деятельности (производителя, потребителя, поверочной лаборатории).

Во втором разделе исследуется влияние температуры АЧТ на результаты определения показателя визирования (ПВ) пирометров, влияние пропускания излучения атмосферой, эффекта размера источника (ЭРИ), температуры источника отражённого излучения на неопределенность измерений при контроле пирометров и тепловизоров. Приводятся результаты их сравнительной оценки.

Для пирометров ПВ определяют уменьшая апертуру АЧТ до тех пор пока его показания не изменятся на величину допустимой погрешности (dT). Температура АЧТ (T_{bb}) при этом не нормирована. Экспериментальные значения ПВ пирометров Fluke 572, DT 8835, АКИП полученные при различной T_{bb} приведены в диссертации и, для Fluke 572, на рисунке 1. Значения ПВ отличаются до 5,5 раз, так как заданному значению dT , при произвольной T_{bb} , соответствует различная доля энергии излучения φ , поступающей в пирометр от АЧТ.

Долю энергии φ предложено вычислять по формуле

$$\varphi = (S'_{input} - S_{refl}) / (S_{input} - S_{refl}), \quad (1)$$

где S'_{input} , S_{input} , S_{refl} – спектральная поверхностная плотность потока излучения соответствующая температуре измеренной пирометром после и перед уменьшением апертуры АЧТ, температуре окружающей среды (T_{refl}), Вт/м³.

Температуру АЧТ находят решая (1) для указанного в паспорте значения φ . При разработке новых методик поверки T_{bb} предложено нормировать. Для заданных: φ , T_{bb} , T_{refl} , используя (1), рассчитывают S'_{input} . Показания пирометра (T_a) при которых прекращают уменьшение апертуры АЧТ вычисляют по формуле

$$T_a = c_2 / (\lambda_e \ln(c_1 / S'_{input} \lambda_e^5 + 1)), \quad (2)$$

где c_2 , c_1 – радиационные постоянные; λ_e – эффективная длина волны, м.

Формула (2) получена преобразованием известного закона Планка связывающего спектральную поверхностную плотность излучения тела с его температурой. Полученные значения ПВ приведены в диссертации и, для Fluke 572, на рисунке 1. Размах значений ПВ менее 5 % и обусловлен тщательностью измерений.

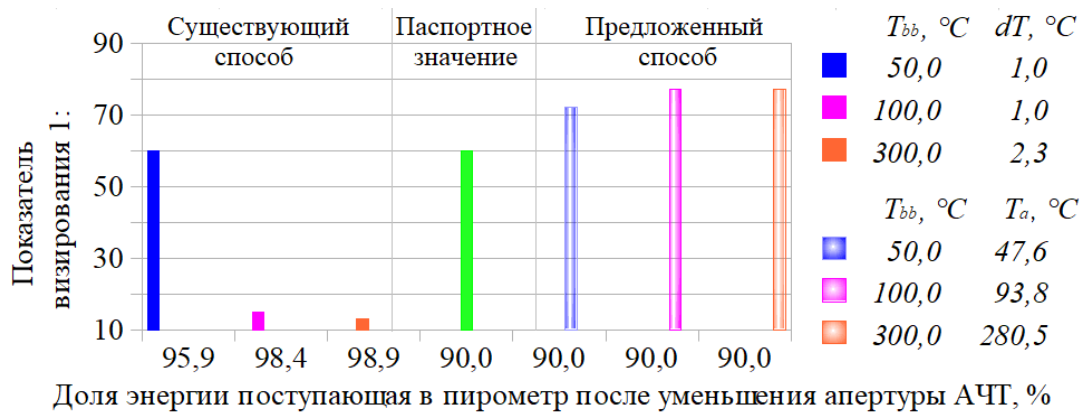


Рисунок 1 – Экспериментальные значения ПВ пирометра Fluke 572

Прохождение теплового излучения через слой атмосферы описывается уравнением заимствованным у W. Minkina:

$$S_l = S_0 M_{atm} + S_{Tatm} (1 - M_{atm}), \text{ Вт/м}^2, \quad (3)$$

$$M_{atm} = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} M_{\lambda, atm} S_{\lambda, T} d\lambda / \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} S_{\lambda, T} d\lambda, \quad M_{\lambda, atm} = \exp(-a_{\lambda} l),$$

$$S_{\lambda, T} = \lambda^{-5} c_1 / (\exp(c_2 / \lambda T_{bb}) - 1), \text{ Вт/м}^3,$$

где S_l (S_0) – поверхностная плотность прошедшего (исходного) излучения, Вт/м²; M_{atm} – интегральное пропускание атмосферы; S_{Tatm} – поверхностная плотность излучения испускаемого атмосферой, Вт/м²; λ_a, λ_b – границы спектрального диапазона, м; $S_{\lambda,T}$ – спектральная поверхностная плотность исходного излучения, Вт/м³; $M_{\lambda,atm}$ – монохроматическое пропускание атмосферы; a_λ – коэффициент ослабления, м⁻¹; l – толщина слоя; λ – длина волны, м; T_{bb} – температура АЧТ, К.

Если температура источника излучения неизвестна вместо интегрального вычисляют среднее пропускание атмосферы по формуле:

$$M_{atm} = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} M_{\lambda,atm} d\lambda. \quad (3a)$$

Коэффициент a_λ определяется совокупностью молекулярного селективного и континуального поглощения, молекулярного рассеяния, аэрозольного ослабления. Для расчета селективного поглощения использована система «СПЕКТРА» (<http://spectra.iao.ru>), – континуального поглощения водяного пара – обобщённая модель Баранова Ю. И. и Мицель А. А. Молекулярное рассеяние атмосферы определяется длиной волны излучения и от условий поверки не зависит. Аэрозольное ослабление выражается через метеорологическую дальность видимости.

Влияние пропускания атмосферы исследовано для приборов, чувствительных в спектральных диапазонах (5–14) мкм; (7,5–13) мкм; (7,5–14) мкм; (8–14) мкм при расстоянии до АЧТ (0,25 – 3) м. Буферный газ – азот.

Анализ пропускания излучения водяным паром и углекислым газом выполнен при изменении температуры воздуха от 15 до 25 °С (от 18 до 28 °С для диапазона (5–14) мкм), относительной влажности от 30 до 80 %, атмосферного давления от 97,3 до 105,3 кПа, объемной концентрации CO₂ от 0,04 до 0,12 %.

Анализ пропускания излучения смесью CO, CH₄, NO, N₂O, NO₂, NH₃, O₃, SO₂ выполнен при изменении объемной концентрации: O₂ от 0,000002 до 0,000008 %, CO – от 0,00009 до 0,00052 %, NO – от 0,000005 до 0,00003 %, SO₂ – от 0,0000002 до 0,0000008 %, NO₂ – от 0,0000016 до 0,000004 %, NH₃ – от 0,000001 до 0,00003 %. Концентрация N₂O – 0,000033 %, CH₄ – 0,00018 %. Значения концентраций выбраны из справочных данных о составе атмосферы. Температура воздуха – 23 °С, атмосферное давление 101,325 кПа. Анализ аэрозольного ослабления выполнен для изменения метеорологической дальности видимости от 10 до 20 км.

Расчетные значения среднего пропускания излучения углекислым газом и водяным паром приведены на рисунках 2–4 линиями. Изменение среднего пропускания при изменении влияющих величин показано «лапками».

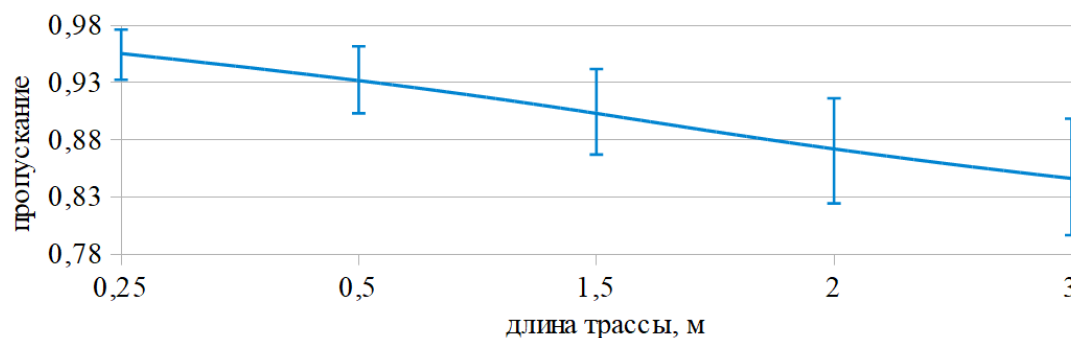


Рисунок 2 – Среднее пропускание излучения водяным паром в диапазоне (5–14) мкм

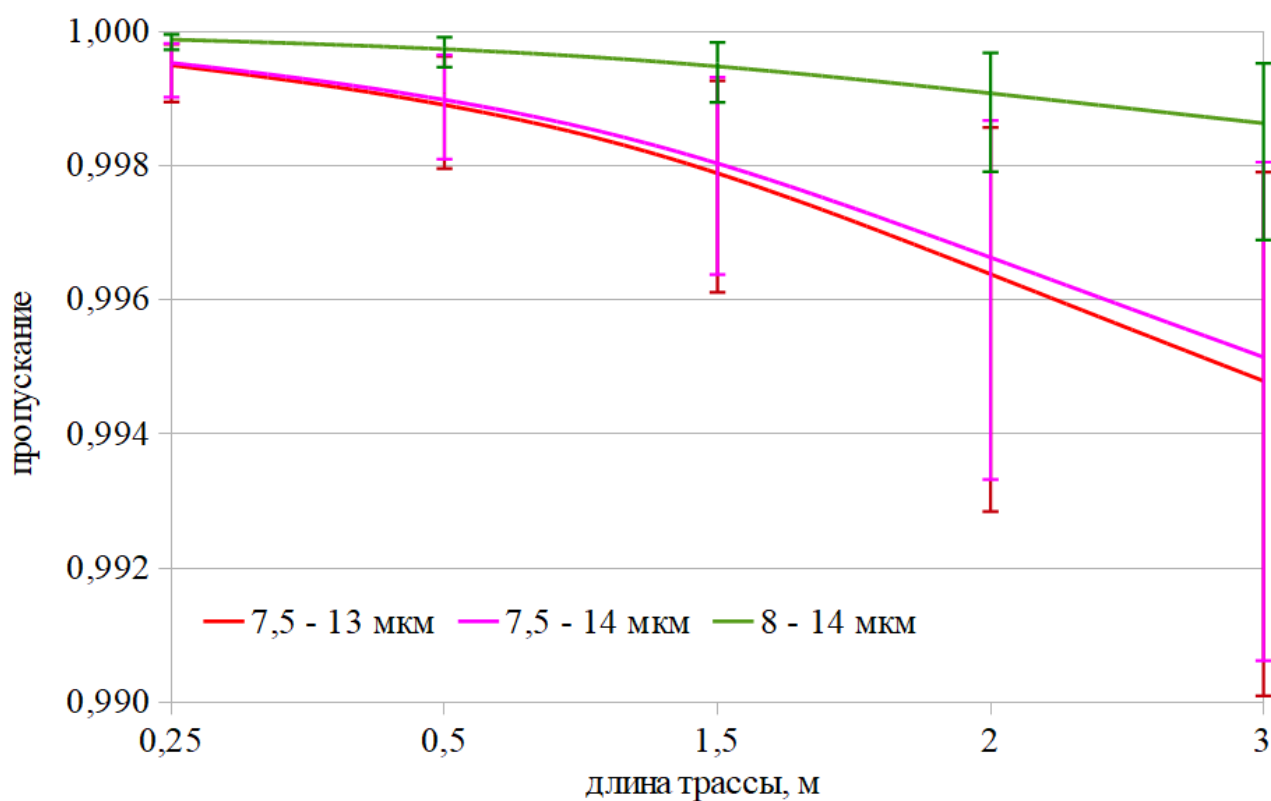


Рисунок 3 – Среднее пропускание излучения водяным паром в диапазонах (7,5–13) мкм, (7,5–14) мкм и (8–14) мкм

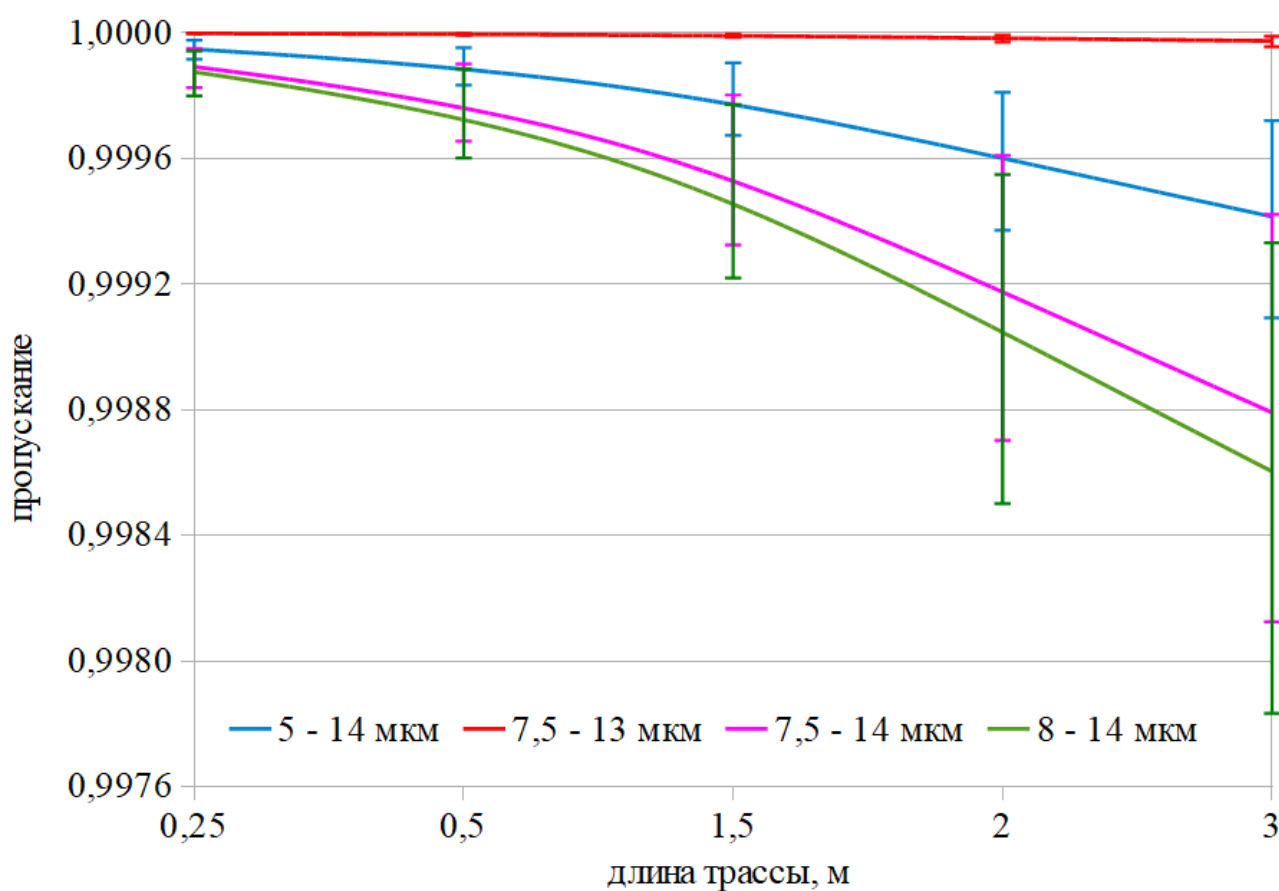


Рисунок 4 – Среднее пропускание излучения углекислым газом в диапазонах (5–14) мкм, (7,5–13) мкм, (7,5–14) мкм и (8–14) мкм

Дополнительную погрешность измерений, вызванную отклонением пропускания атмосферы от среднего значения и (или) изменением температуры отражённого излучения предложено вычислять по формуле

$$\begin{aligned}\Delta T_a &= \frac{c_2}{\lambda_e \ln(c_1/S_1 \lambda_e^5 + 1)} - \frac{c_2}{\lambda_e \ln(c_1/S_2 \lambda_e^5 + 1)}, \\ S_1 &= \frac{c_1(1 - M_1)}{\lambda_e^5 (\exp(c_2/\lambda_e T_{bb}) - 1)} + \frac{c_1 M_1}{\lambda_e^5 (\exp(c_2/\lambda_e T_{refl1}) - 1)}, \\ S_2 &= \frac{c_1(1 - M_2)}{\lambda_e^5 (\exp(c_2/\lambda_e T_{bb}) - 1)} + \frac{c_1 M_2}{\lambda_e^5 (\exp(c_2/\lambda_e T_{refl2}) - 1)},\end{aligned}\quad (4)$$

где $M_1, (M_2)$ – интегральный коэффициент молекулярного пропускания при действительных (номинальных) значениях влияющих величин; T_{bb} – температура АЧТ, К; T_{refl1}, T_{refl2} – температура окружающей среды, К.

Среднее расчётное пропускание излучения смесью $O_3, N_2O, CO, CH_4, NO, SO_2, NO_2, NH_3$ не ниже 0,9999. Отклонения от среднего не более $\pm 0,00005$. Среднее расчётное аэрозольное пропускание не ниже 0,99998. Отклонения от среднего не более $\pm 0,00001$. Дополнительная погрешность измерений вычисленная по (4) не превышает 0,05 °С (при $T_{bb} \leq 1500$ °С) и ввиду малости не учитывается.

Дополнительная погрешность вызванная изменением пропускания излучения водяным паром и углекислым газом приведены в диссертации и используются для оценки неопределённости измерений при поверке.

Дополнительная погрешность, вызванная ЭРИ, для различных типов пирометров достигает (80–350) %, а для тепловизоров (16–83) % от допустимой погрешности. Существенное влияние ЭРИ отмечено в работах Whittam A., Yoo Y. Для обеспечения единства измерений необходимым и достаточным является нормирование в новых методиках поверки апертуры АЧТ и расстояния до него. При выполнении работ по действующим методикам следует воспроизводить условия заводской калибровки.

Для оценки расширенной неопределённости измерений U_0 при контроле пирометров и тепловизоров предложена формула

$$U_0 = 2\sqrt{u(T)^2 + u(\Delta Tw)^2 + u(\Delta Tc)^2 + u(\Delta Tr)^2 + u(Ts)^2 + u(Tm)^2}, \quad (5)$$

где $u(T)$ – стандартная неопределённость эталона, °С; $u(\Delta Tw), u(\Delta Tc), u(\Delta Tr), u(Ts), u(Tm)$ – стандартные неопределённости, обусловленные поглощением излучения водяным паром, углекислым газом, изменением температуры отражённого излучения, неравномерностью чувствительности по полю кадра тепловизора, случайными составляющими, °С.

Сравнительная оценка не исключаемых составляющих: $u(T), u(\Delta Tw), u(\Delta Tc), u(\Delta Tr)$ входящих в (5), для тех или иных условий (расстояние до АЧТ – L, излучающая способность АЧТ – E_{acht}), приведена на рисунках 5–8.

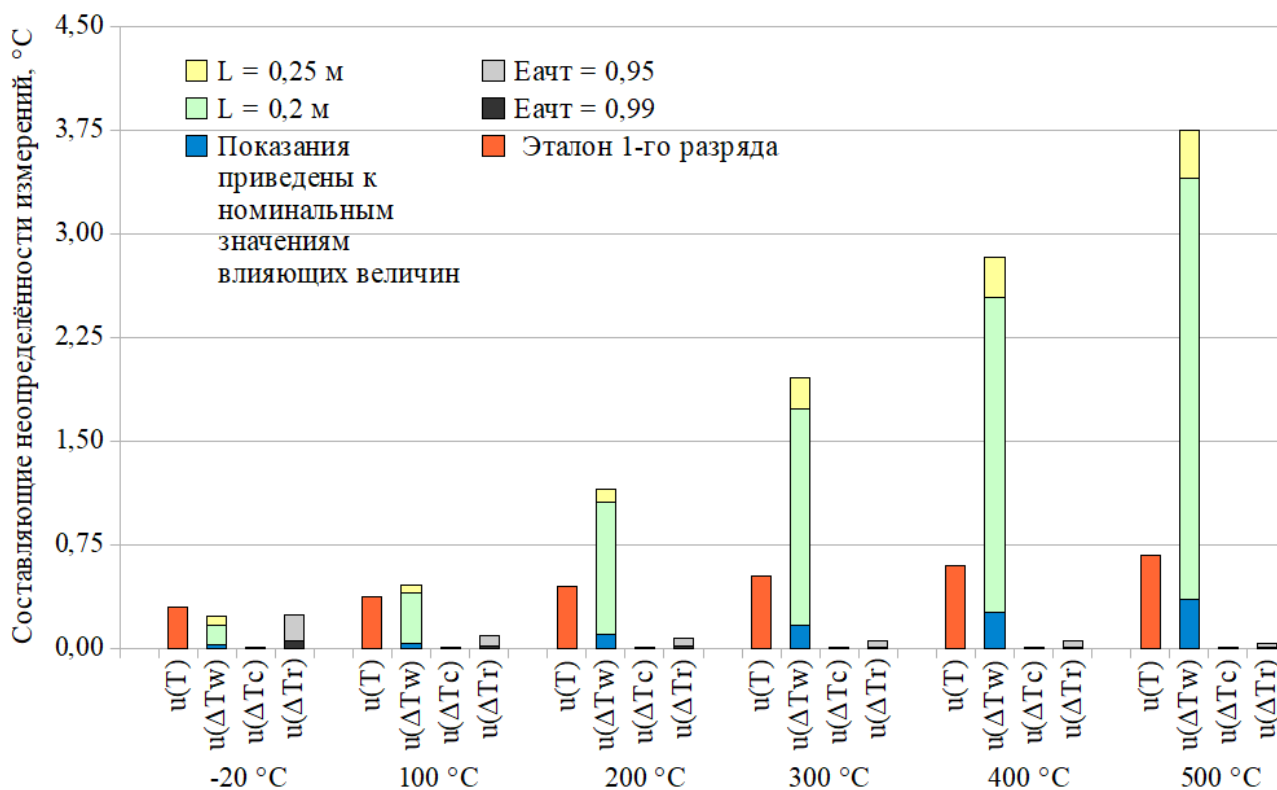


Рисунок 5 – Составляющие неопределенности измерений при поверке и калибровке приборов, чувствительных в спектральном диапазоне (5–14) мкм

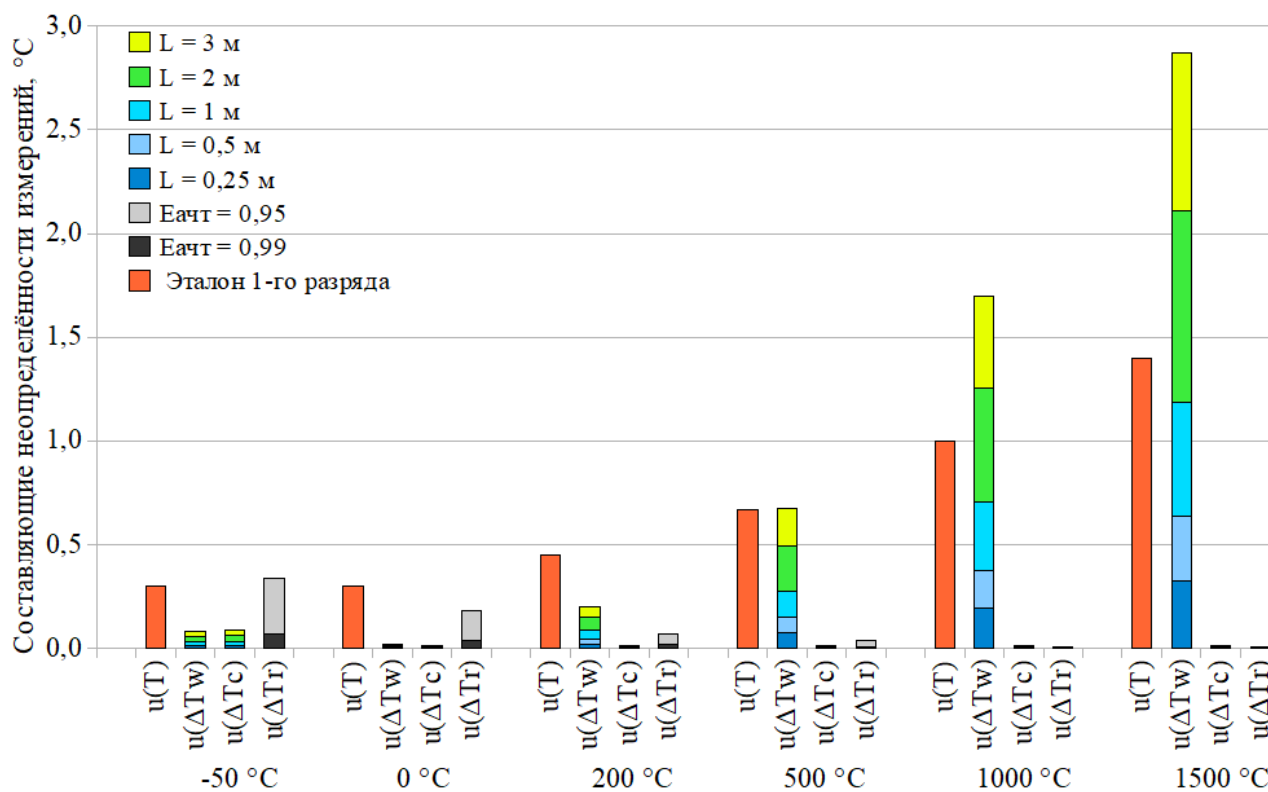


Рисунок 6 – Составляющие неопределенности измерений при поверке и калибровке приборов, чувствительных в спектральном диапазоне (7,5–13) мкм

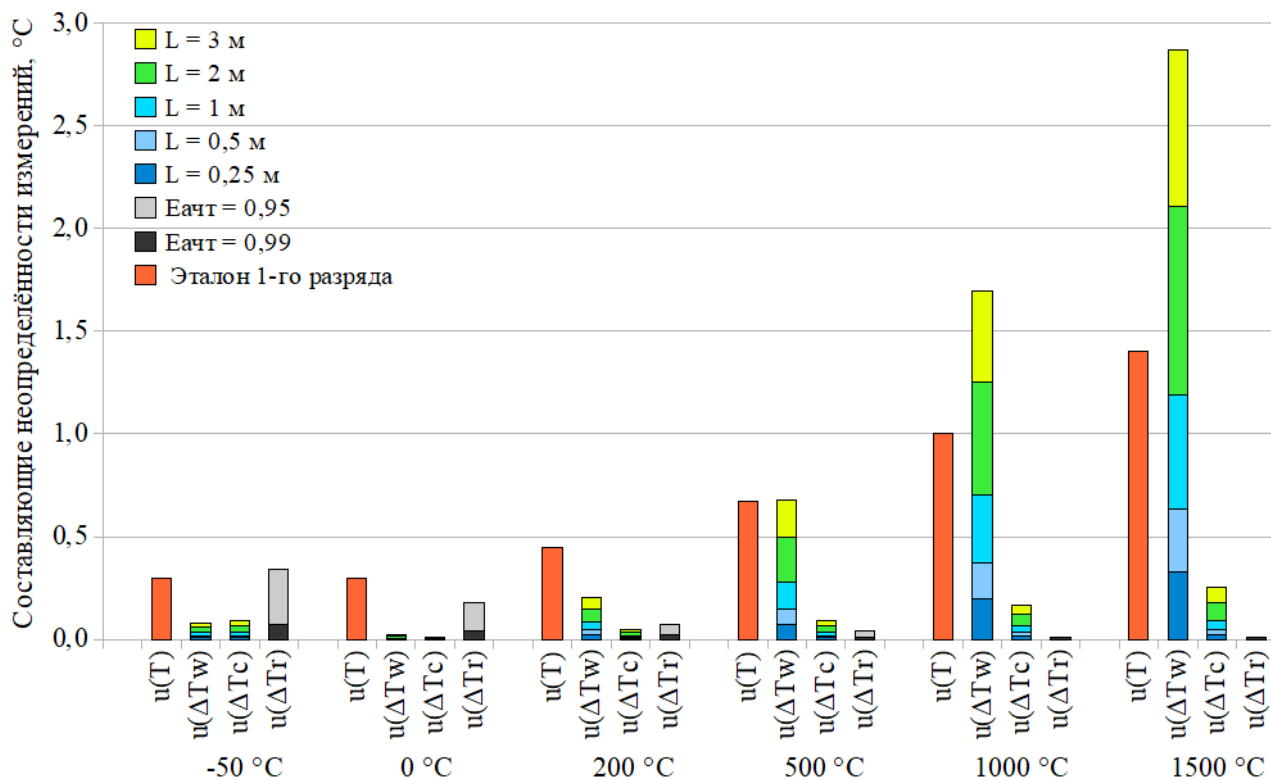


Рисунок 7 – Составляющие неопределенности измерений при поверке и калибровке приборов, чувствительных в спектральном диапазоне (7,5–14) мкм

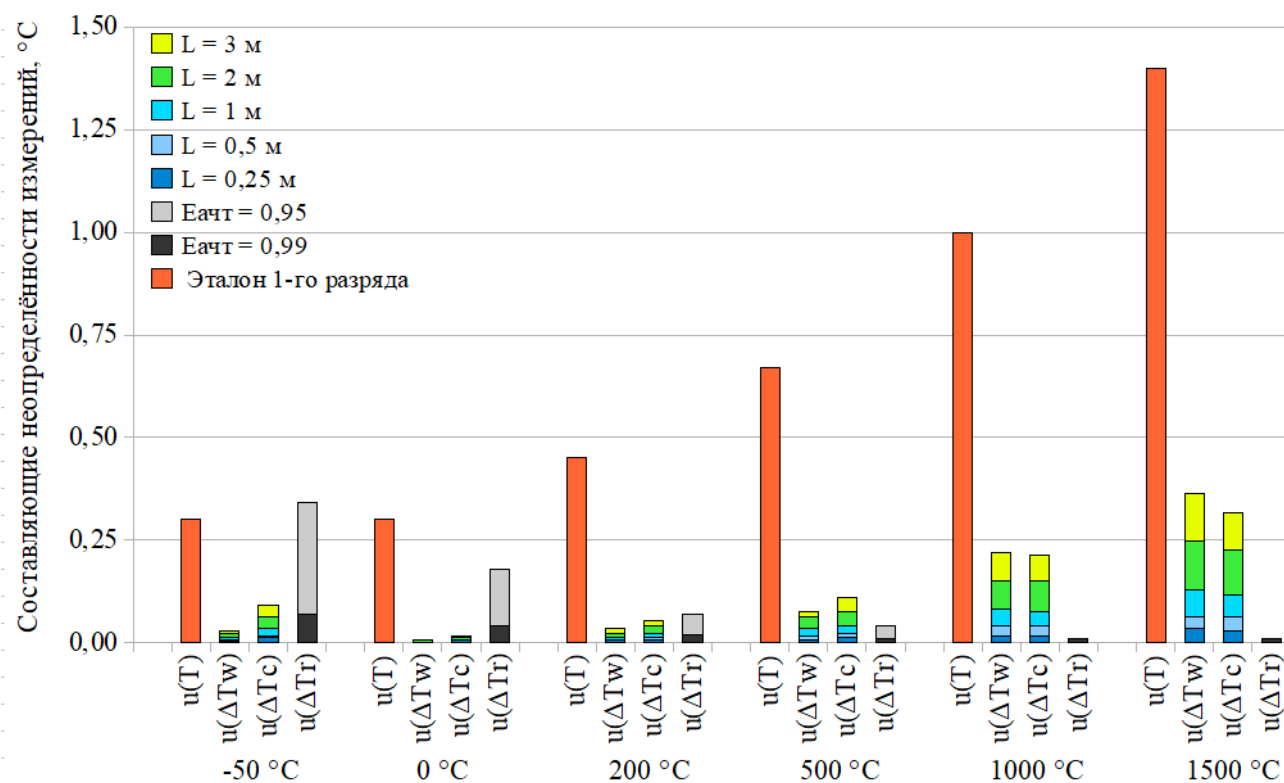


Рисунок 8 – Составляющие неопределенности измерений при поверке и калибровке приборов, чувствительных в спектральном диапазоне (8–14) мкм

Из анализа представленных данных следует, что: составляющая неопределенности, вызванная поглощением излучения водяным паром, для пирометров чувствительных в диапазоне (5–14) мкм (пирометры АКИП), до 5 раз превышает составляющую неопределенности воспроизведения температуры АЧТ 1-го разряда. Приведение результатов измерений к номинальным значениям влияющих величин, уменьшает данную составляющую до 10 раз.

Составляющая неопределенности измерений, вызванная поглощением излучения водяным паром для приборов, чувствительных в диапазонах (7,5–13) мкм и (7,5–14) мкм, сопоставима или превышает составляющую неопределенности воспроизведения температуры эталоном 1-го разряда.

Составляющие неопределенности измерений, вызванные поглощением излучения водяным паром в диапазоне (8–14) мкм, углекислым газом во всех диапазонах, в четыре и более раз меньше составляющей неопределенности воспроизведения температуры эталоном 1-го разряда и могут не учитываться.

Составляющая неопределенности измерений, вызванная изменением температуры отраженного излучения, существенна только при воспроизведении низких температур АЧТ с излучающей способностью 0,95 (Fluke 4180).

Третий раздел посвящен разработке и исследованию специализированных моделей АЧТ. Модели представляют собой излучающую вставку, помещаемую в жидкостный термостат. Внутренняя полость вставок покрыта термостойкой краской. Температура теплоносителя измеряется термометром ПТСВ-1-2 2-го разряда и измерителем МИТ 8.15. Диапазон воспроизводимой температуры: (минус 50–20) °С, (20–80) °С, (80–200) °С. Излучающая способность краски оценивается интервалом (0,89–0,94). Схема вставок приведена на рисунке 9.

Распределение температуры во вставках, с учетом осевой симметрии, описывается уравнением Фурье – Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{d\tau} &= \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \\ T(t = 0, x, z) &= T_a, \\ \lambda &= F_\lambda(T_{(x,z)}, x, z), \quad c = F_c(T_{(x,z)}, x, z), \quad \rho = F_\rho(T_{(x,z)}, x, z), \\ Q_{(x,z) \in A} &= \alpha_1 (T_w - T_{c(x,z)}) dF_c, \quad Q_{(x,z) \in E} = 0, \\ Q_{(x,z) \in B} &= \alpha_2 (T_a - T_{c(x,z)}) dF_c + \varepsilon_{c(x,z)} \sigma (T_a^4 - T_{c(x,z)}^4) K_{(x,z)} dF_c, \\ Q_{(x,z) \in C} &= \alpha_2 (T_a - T_{c(x,z)}) dF_c + \varepsilon_{c(x,z)} \sigma (T_a^4 - T_{c(x,z)}^4) K_{(x,z)} dF_c, \\ Q_{(x,z) \in D} &= \alpha_3 (T_w - T_{c(x,z)}) dF_c + \varepsilon_{c(x,z)} \sigma (T_a^4 - T_{c(x,z)}^4) K_{(x,z)} dF_c, \\ K_{(x,z) \notin D} &= 1, \quad K_{(x,z) \in D} = \int_{F_a \in G} \varepsilon_{a(x,z)} \frac{\cos(\varphi_c) \cos(\varphi_a)}{\pi r_{ac}^2} dF_a, \end{aligned} \tag{6}$$

где dT – приращение температуры, $^{\circ}\text{C}$; $d\tau$ – приращение времени, с; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{C})$; c – коэффициент теплоемкости, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C})$; ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$; T_a – температура окружающей среды; F_λ , F_c , F_p – функции (или матрицы), определяющие зависимость физических свойств материала вставки от пространственных координат x , z ; Q – количество теплоты, получаемое (отдаваемое) элементарной площадкой dF_c ; α_1 , α_2 , α_3 – коэффициенты конвективной теплоотдачи; T_w – температура омывающей среды (теплоноситель или газ из системы обдува); T_c – температура омываемой поверхности; ε_c – коэффициент излучения облучаемого участка dF_c ; ε_a – коэффициент излучения облучающей площадки dF_a ; φ_c (φ_a) – угол между нормалью к площадке dF_c (dF_a) и направлением на площадку dF_a (dF_c); r_{ac} – расстояние между площадками dF_c и dF_a , м; dF_a – площадь облучающей площадки, м^2 .

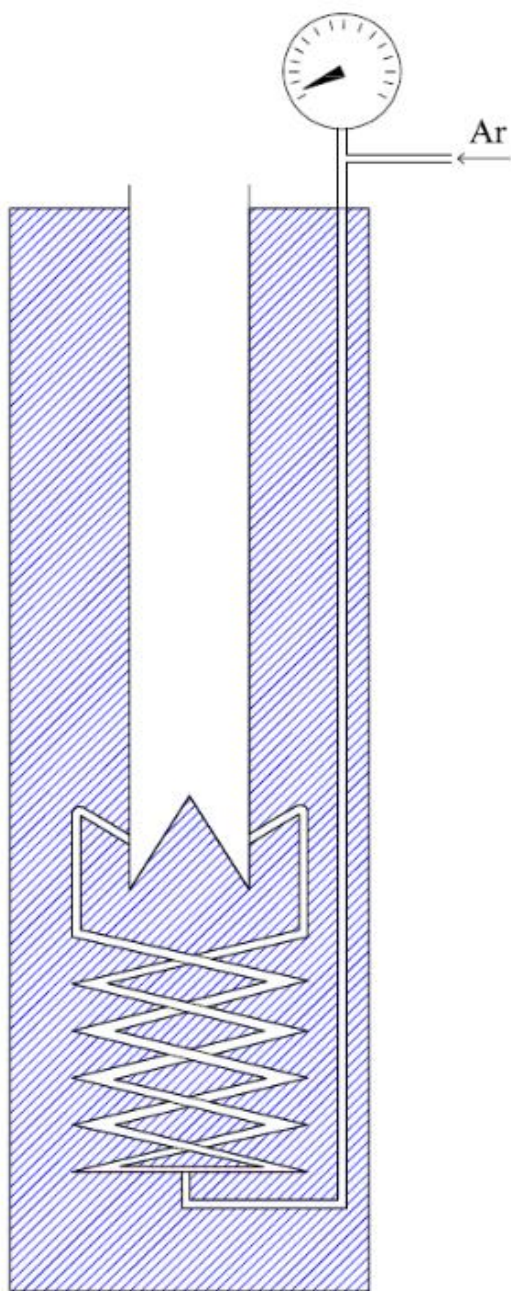


Рисунок 9 – Схема излучающей полости

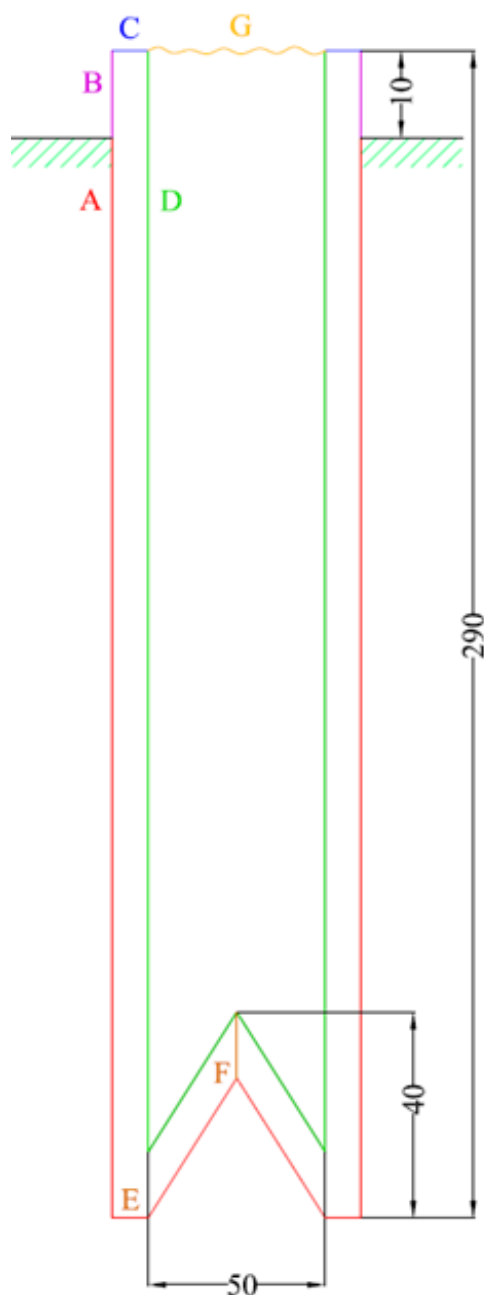


Рисунок 10 – Участки излучающей полости

Начальная температура T в начальный момент времени t принимается равной температуре атмосферы T_a . Физические краевые условия заданы параметрами λ , c , ρ . Геометрические краевые условия определяются формой вставки.

Граничные краевые условия задаются для каждого из характерных участков вставки (рисунок 10). На участке А имеет место конвективный теплообмен с теплоносителем. На участках В, С – лучистый и конвективный теплообмен с окружающей средой. На участке D – лучистый теплообмен с окружающей средой и внутренней полостью вставки и, при температуре вставки выше температуры окружающей среды, конвективный теплообмен с окружающей средой. Участок Е – сочленение цилиндрической и конической частей вставки. Участок F – адиабатический. Участок G – апертура вставки.

Система уравнений (6) решена для отметок минус 50, минус 40, минус 20, 0, 20, 40, 60, 80, 120, 160 и 200 °С. Расчетные распределения температуры подтверждены экспериментально, что обеспечивает прослеживаемость воспроизводимой «видимой» температуры.

Для минимизации конвективных тепловпотерь средне- и высокотемпературная вставка снабжены системой обдува внутренней полости. Это позволяет в (4–10) раз уменьшить разность температуры теплоносителя и дна вставки.

Расчет эффективной излучающей способности вставок выполнен для экспериментальных распределений температуры двумя независимыми методами: на основе уравнений теплового баланса и теории зеркально-диффузного отражения. Значение коэффициента излучения краски изменялось от 0,89 до 0,94 с шагом 0,01. Значение коэффициента диффузности изменялось от 0 до 1 с шагом 0,1. Результаты счета приведены на рисунке 11.

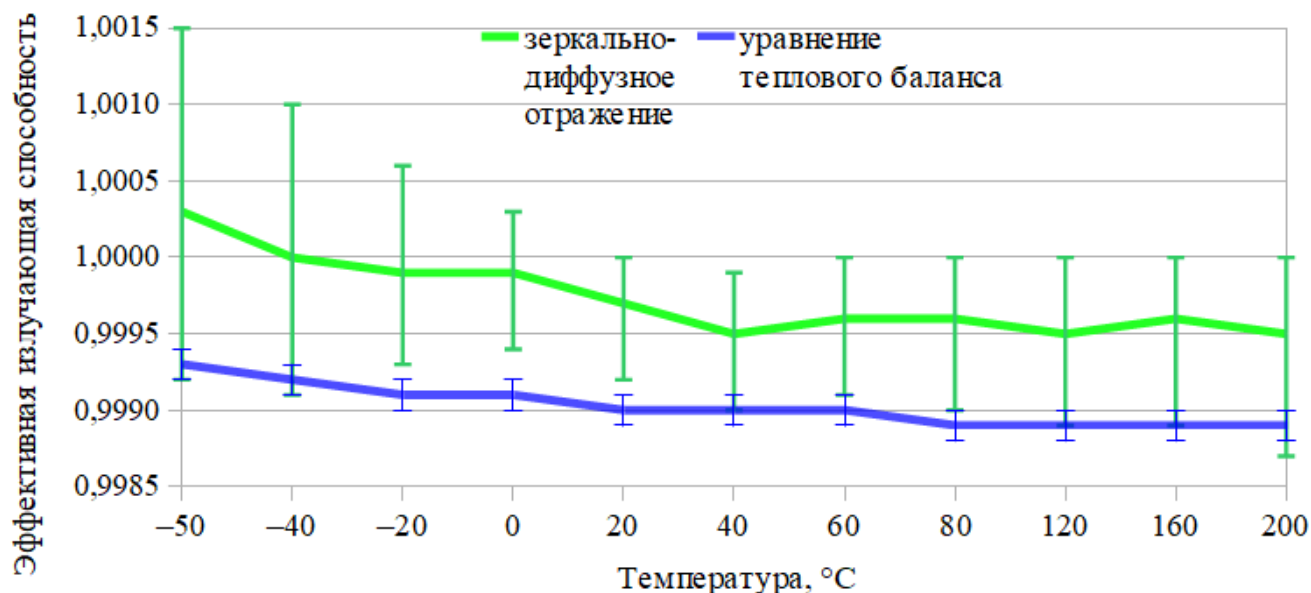


Рисунок 11 – Эффективная излучающая способность АЧТ

Эффективная излучающая способность низкотемпературной вставки оцениваются значением $1,000 \pm 0,001$ ($1,0003 \pm 0,0012$ при температуре ниже минус 40 °С), среднетемпературной вставки – $0,9995 \pm 0,0005$, высокотемпературной вставки – $0,9994 \pm 0,0007$.

Расширенную неопределенность воспроизведения температуры U моделями АЧТ предложено вычислять по формуле

$$U = 2 \sqrt{\frac{\delta_{ref}^2}{4} + \frac{n_{ref}^2}{3} + \frac{\Delta_{mit}^2}{3} + \frac{n_T^2}{3} + \frac{\Delta T_\varepsilon^2}{3} + \frac{g_T^2}{3}}, \quad (7)$$

где δ_{ref} , n_{ref} – доверительная погрешность и годовая нестабильность эталонного термометра, °С; Δ_{mit} – допускаемая погрешность МИТ 8.15, °С; n_T – нестабильность термостата °С; ΔT_ε – погрешность воспроизведения температуры, из-за неточного знания излучающей способности вставки, °С; g_T – разность температуры теплоносителя и внутренней поверхности дна вставки, °С.

Значения U , вычисленные по (7), составляют (0,03–0,3) °С (рисунок 12), что в 3–20 раз меньше доверительных границ погрешности δ_{lp} АЧТ 1-го разряда.

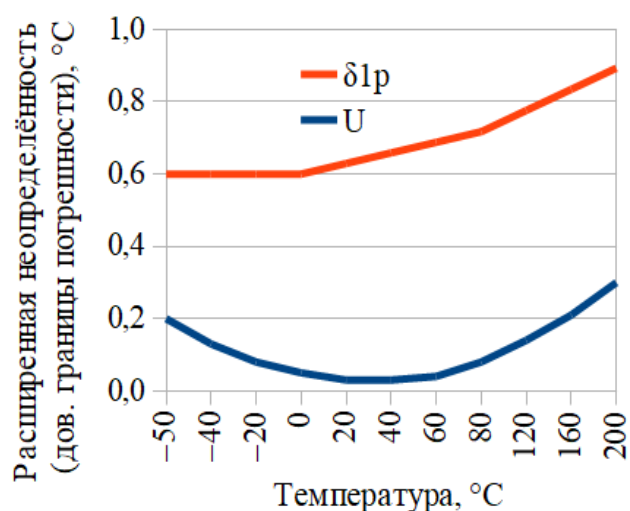


Рисунок 12 – Сравнение моделей АЧТ

Четвертый раздел посвящен оценке достоверности результатов контроля методом ИМ. По результатам поверки, выполненной в ФБУ «Новосибирский ЦСМ» в 2010–2016 годах, разработаны статистические модели погрешности пирометров АКПИ, Testo 830, Sight, тепловизоров Testo 875–882, Flir. Объем выборки от 185 до 502 СИ, число поверяемых отметок – от 7 до 9. Идентификация законов распределения погрешности выполнена методом максимального правдоподобия. Альтер-

нативно рассматривались распределения Лапласа, Коши, нормальное и равномерное распределение. В итоге для всех случаев принята гипотеза об усеченном нормальном законе распределения погрешностей СИ. Точки усечения определены по параметрам равномерного распределения. Параметры моделей (математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение и коэффициенты корреляции значений погрешности в различных поверяемых отметках) приведены в диссертации.

Установлено наличие высокой положительной корреляции для двух групп поверяемых отметок, что позволяет рекомендовать контролировать погрешность поверяемых СИ в четырех точках диапазона измерений: при температуре, близкой к окружающей среде, нижнему и верхнему пределам измерений, и в точке, соответствующей изменению способа нормирования погрешности данных СИ, – 100 °С. Алгоритм ИМ представлен на рисунке 13. Его особенностью является возможность учёта неопределённости измерений U и моделирования точек, по которым определяется годность СИ, но не включаемых в число поверяемых ($S_{xerror}(i) = -1$).

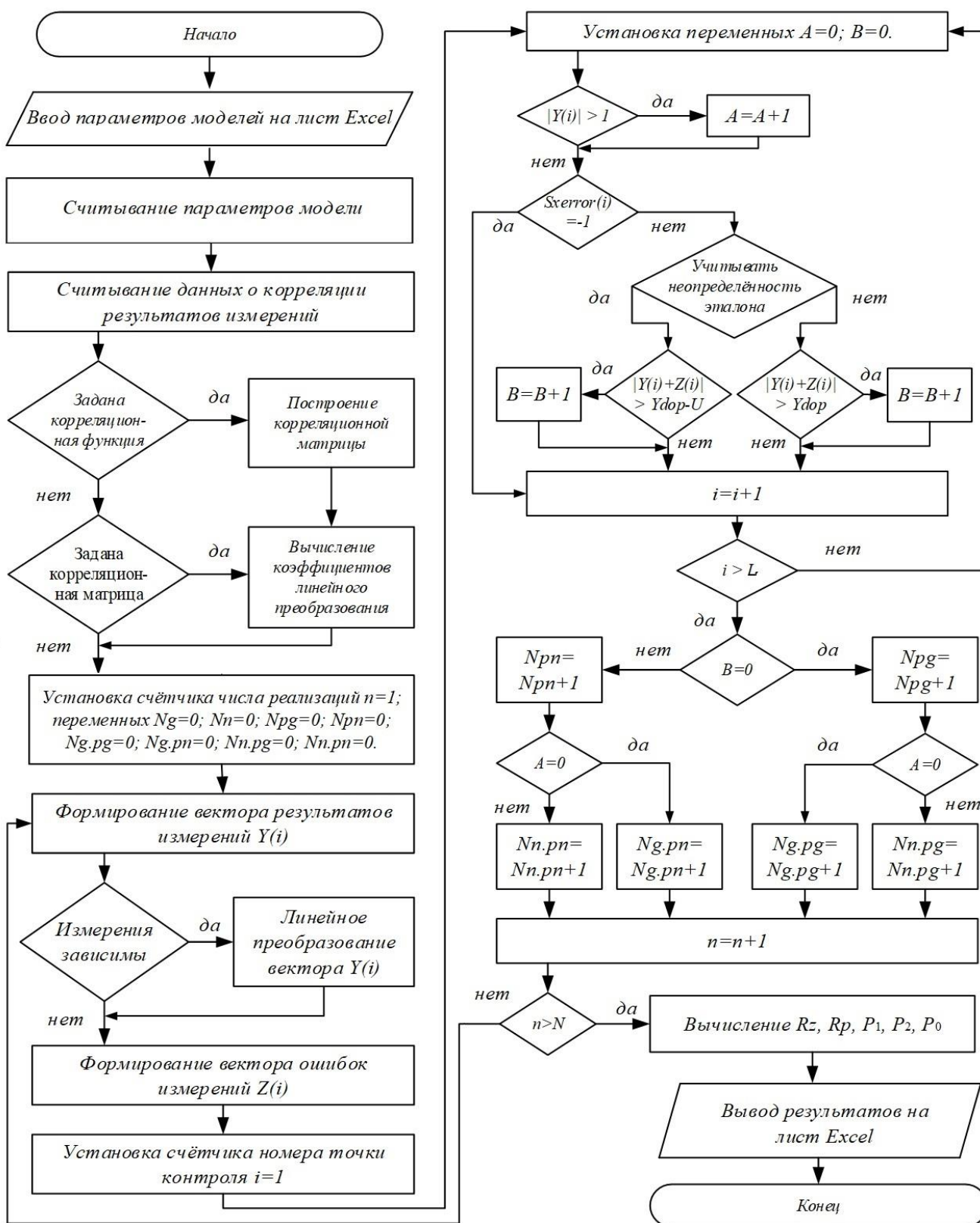


Рисунок 13 – Алгоритм имитационного моделирования процедуры поверки

При моделировании, для каждого из N проверяемых СИ, формируется вектор результатов измерений $Y(i)$ ($i = 1 \dots L$), вектор ошибок измерений $Z(i)$. Значения вектора $Y(i)$ сравниваются с допустимыми значениями Y_{dop} . Если во всех точках $Y(i) \leq Y_{dop}$, то СИ является пригодным (общее число событий N_g), иначе – непригодным (N_n). Переменная A устанавливается равной 1. Для точек вектора $Y(i)$, входящих в число проверяемых, значения искажаются в соответствии с принятой моделью неопределенности измерений. Если все искаженные реализации находятся в допуске, то СИ признается пригодным (N_{pg}), иначе СИ признается непригодным (N_{pn}). Переменная B устанавливается равной 1.

Если в некоторой реализации $A = 1$ и $B = 0$, то негодное СИ признается годным (общее число событий $N_{n.pg}$). Если $A = 0$ и $B = 1$, то годное СИ признается негодным ($N_{g.pn}$). При $A = 0$ и $B = 0$ годное СИ признается годным ($N_{g.pg}$). При $A = 1$ и $B = 1$ негодное СИ признается негодным ($N_{n.pn}$).

Показатели достоверности вычисляются по формулам принятым в теории допускового контроля:

$$R_z = \frac{N_{n.pg}}{N_{pg}}, R_p = \frac{N_{g.pn}}{N}, P_1 = \frac{N_{g.pn}}{N_g}, P_2 = \frac{N_{n.pg}}{N_n}, P_n = \frac{N_{g.pn} + N_{n.pg}}{N}, \quad (8)$$

где R_z, R_p – риск заказчика и производителя; P_1, P_2 – условные вероятности ошибок контроля 1-го, 2-го рода; P_n – вероятность любого неверного решения.

Показатели R_z, R_p характеризуют качество поверки с точки зрения потребителя и производителя. Показатели P_1, P_2 отражают качество собственно методики контроля. Использование условных вероятностей более информативно, так как они в меньшей степени зависят от качества поступающих на поверку СИ. Вероятность P_n – позволяет, оценить риск оказания некачественной услуги.

Поверка пирометров Sight, пирометров и тепловизоров Testo смоделирована для отметок: минус 20, 50, 100, 200, (280–300) °C и (350–400) °C. Поверка пирометров АКИП и тепловизоров Flir смоделирована для отметок: минус 20, 100, 200, 300, 400, 500 и 600 °C (только для Flir). Число реализаций $4,8 \cdot 10^6$.

Расчетные значения достоверности, вычисленные по формулам (8), приведены на рисунке 14.

Вероятность принятия любого неверного решения при использовании АЧТ 2-го разряда составляет (16,5–32,4) %, АЧТ 1-го разряда – (7,6–18,2) %, эти значения, трудно признать удовлетворительными, хотя формально они не нормированы. Разработанные АЧТ позволяют уменьшить вероятность принятия любого неверного решения до (2–6) % и в 2–4 раза повысить достоверность результатов поверки. Уменьшение числа проверяемых отметок до четырех увеличивает вероятность P_n не более чем на (0,2–0,6) %. Влияние ЭРИ проанализировано на примере тепловизоров Testo. При экспериментально полученных значениях ЭРИ $P_n = 33,6$ %, что в 3,6 раза больше значений, теоретически обеспечиваемых АЧТ 1-го разряда. Пренебрежение поглощающими свойствами атмосферы, при поверке пирометров АКИП, увеличивает P_n в 2 раза, до 15,1 %.

Для внедрения результатов исследований разработано и сертифицировано специализированное ПО, позволившее в 3–5 раз сократить трудозатраты на обработку результатов контроля.

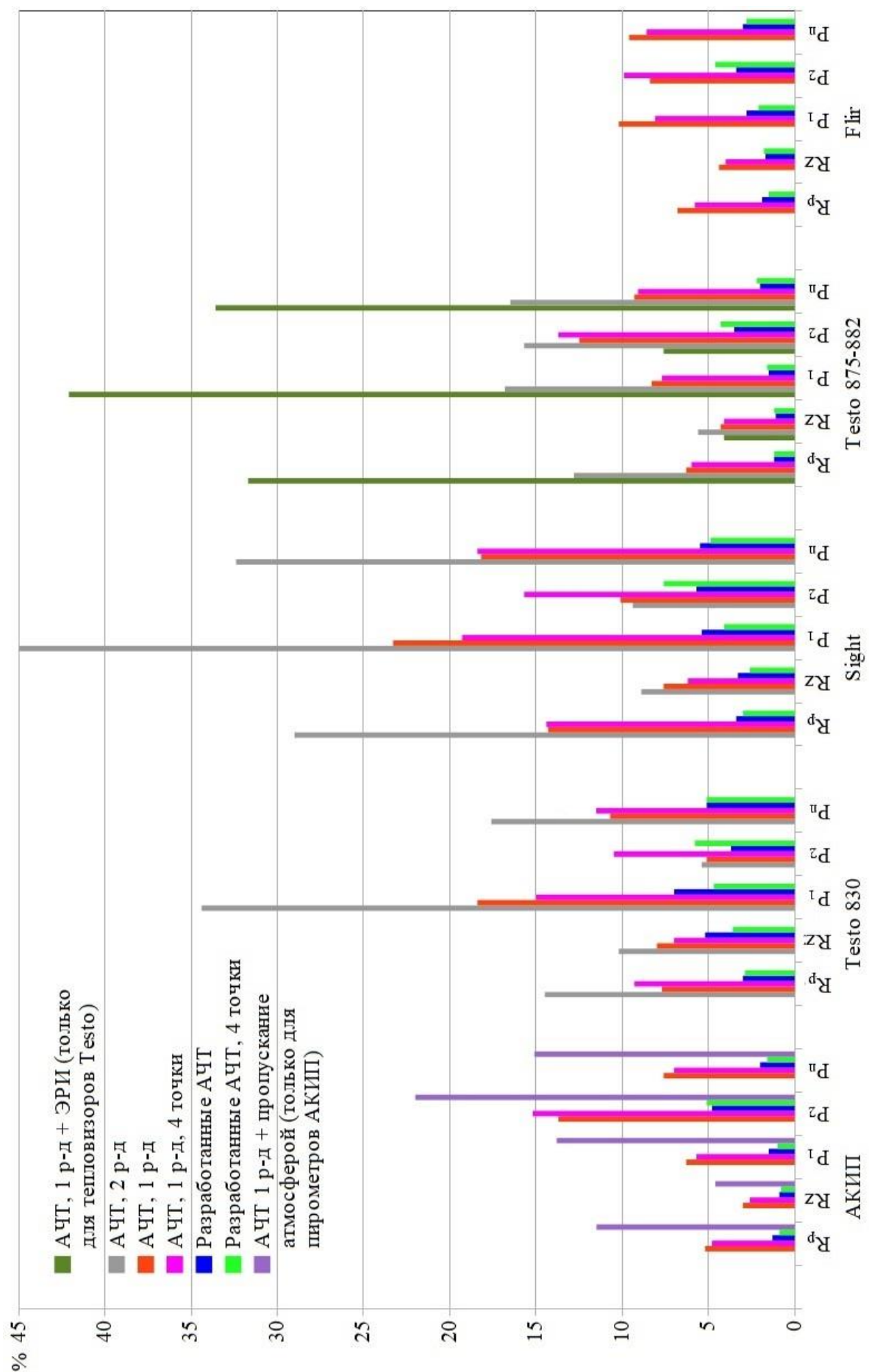


Рисунок 14 – Показатели достоверности результатов поверки пиометров, тепловизоров

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено влияние температуры АЧТ на результаты определения показателя визирования пирометров. Предложена формула позволяющая найти температуру АЧТ при которой следует определять показатель визирования в соответствии с действующими методиками поверки. Во вновь разрабатываемых методиках поверки температуру АЧТ при определении показателя визирования пирометров следует нормировать.

2 Теоретически и экспериментально исследовано влияние пропускания атмосферы на достоверность результатов поверки.

Установлено, что для пирометров АКИП, чувствительных в диапазоне (5–14) мкм, составляющая неопределенности измерений, обусловленная изменением пропускания излучения водяным паром, до 5 раз превышает доверительные границы погрешности АЧТ 1-го разряда.

Вероятность ошибки контроля 1-го рода достигает 13,8 %, вероятность ошибки контроля 2-го рода – 22,0 %. Приведение результатов измерений к номинальным значениям влияющих величин позволяет повысить достоверность результатов поверки в 1,5–2,0 раза.

3 Экспериментально исследован ЭРИ шести типов СИ. Установлено, что вероятность ошибки контроля 1-го рода достигает 42 % (для тепловизоров Testo).

Для исключения влияния ЭРИ предложено во вновь разрабатываемых методиках нормировать апертуру АЧТ и расстояние до него. При выполнении работ по действующим методикам следует воспроизводить условия заводской калибровки.

4 Предложен способ оценки неопределенности измерений при поверке и калибровке пирометров и тепловизоров. Построены статистические модели погрешности пирометров АКИП, Testo, Sight, тепловизоров Testo, Flir. Разработан алгоритм имитационного моделирования процедуры поверки. Оценена достоверность результатов поверки пяти типов СИ.

Установлено, что при использовании для поверки АЧТ 1-го разряда вероятность ошибки контроля 1-го рода составляет (6,3–23,3) %, вероятность ошибки контроля 2-го рода составляет (5,1–13,7) %.

Теоретически обоснована возможность уменьшения числа поверяемых отметок на (20–25) % с общепринятых 5–6 до 4. Вероятность принятия любого неверного решения при этом возрастает не более чем на (0,2–0,6) %.

5 Разработаны, изготовлены и исследованы три модели АЧТ, прослеживаемые к Государственному первичному эталону единицы температуры. Расчетное значение расширенной неопределенности воспроизведения температуры оценивается интервалом (0,03–0,3) °С, что в 3–20 раз меньше доверительных границ погрешности АЧТ 1-го разряда. Использование разработанных АЧТ позволяет снизить вероятность ошибки контроля 1-го рода в 2–4 раза, до (1,5–7,0) %, а вероятность ошибки контроля 2-го рода – в 2–3 раза, до (3,5–5,7) %.

6 Разработано специализированное ПО, позволившее внедрить полученные

результаты, в 3–5 раз сократить трудозатраты на обработку результатов метрологического контроля СИ.

7 Использование разработанных моделей АЧТ, приведение результатов измерений к номинальным значениям влияющих величин, однозначное нормирование апертуры АЧТ и расстояния до него позволяет, в совокупности, снизить вероятность ошибок контроля 1-го и 2-го рода, вероятность принятия любого неверного решения от 2 до 10 раз.

В диссертации изложено новое научно обоснованное решение задачи повышения достоверности результатов метрологического контроля пирометров и тепловизоров. Исследованы факторы, влияющие на показатели достоверности контроля, и предложены методы ее повышения. Полученные результаты соответствуют поставленной цели и подтверждены Федеральной службой по аккредитации.

Теоретическая часть исследований выполнена в тесном сотрудничестве с научным руководителем и соавторами приведенных ниже публикаций. Экспериментальная часть исследований выполнена автором самостоятельно.

В качестве перспектив дальнейших исследований следует отметить:

- построение статистических моделей для других типов СИ;
- распространение области исследований на пирометры и тепловизоры, чувствительные в спектральном диапазоне (3–5) мкм;
- разработку методов и средств метрологического контроля пирометров и тепловизоров с использованием «серых» тел.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК:

- 1 Голобоков, М. В. Имитационная модель процедуры поверки средств измерений / М. В. Голобоков, С. Б. Данилевич // Компетентность. – 2016. – № 4. – С. 40–47.
- 2 Голобоков, М. В. Точность измерений и риски при контроле качества / М. В. Голобоков, С. Б. Данилевич, Т. М. Соловьева // Компетентность. – 2017. – № 2. – С. 47–51.
- 3 Голобоков, М. В. Определение показателя визирования и эффект размера источника при поверке пирометров и тепловизоров / М. В. Голобоков, С. Б. Данилевич // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 6. – С. 42–49.
- 4 Голобоков, М. В. Техничко-экономическое обоснование комплектации лаборатории калибровки / М. В. Голобоков, С. Б. Данилевич, Н. Г. Низовкина // Компетентность. – 2017. – № 9–10. – С. 73–77.
- 5 Голобоков, М. В. Модель абсолютно черного тела на основе термостата «ТЕРМОТЕСТ-05-02» / М. В. Голобоков // Контроль. Диагностика. – 2017. – № 11. – С. 40–44.
- 6 Голобоков, М. В. Влияние пропускания атмосферы на достоверность результатов поверки пирометров / М. В. Голобоков, С. Б. Данилевич // Контроль. Диагностика. – 2018. – № 5. – С. 26–31.

7 Голобоков, М. В. Оценка достоверности результатов измерений температуры при поверке пирометров / М. В. Голобоков, С. Б. Данилевич // Метрология. – 2018. – № 3. – С. 50–60.

Научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus и Web of Science:

8 Golobokov, M. V. Automation is an Effective Way to Improve Quality of Verification (Calibration) of Measuring Instruments / M. V. Golobokov, S. B. Danilevich. – DOI: 10.1088/1742-6596/9981/012013 // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 998. – Art. 012013.

9 Golobokov, M. V. Increasing the reliability of Test Results of Infrared Thermometers and Thermal Imaging Cameras / M. V. Golobokov, S. B. Danilevich // 14TH International Scientific Technical Conference On Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 44894 Proceedings APEIE – 2018, Volume 1 Part 1 Sections Electron-Physical Section (Solid-State, Vacuum and Plasma Electronics: Physical Processes, Technologies (including nanotechnologies and nanomaterials), Equipment, Devices) Metrology and Metrological Instrumentation. Pp. 226–230.

Научные работы, опубликованные в других изданиях:

10 Голобоков, М. В. Разработка алгоритма имитационного моделирования процедуры поверки / М. В. Голобоков, С. Б. Данилевич // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2016) : труды XIII Междунар. науч.-техн. конф. (Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г.) / НГТУ. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 3. – С. 74–78.

11 Голобоков, М. В. Оценка достоверности результатов поверки пирометров [Текст] / М. В. Голобоков, С. Б. Данилевич // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2016) : труды XIII Междунар. науч.-техн. конф. (Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г.) / НГТУ. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Т. 3. – С. 79–83.

12 Голобоков, М. В. Влияние пропускания атмосферы на достоверность поверки пирометров / М. В. Голобоков, С. Б. Данилевич // Метрология, стандартизация, управление качеством : материалы II Всерос. конф. (Омск, 19–21 апр. 2017 г.) / ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2017. – С. 9–10.

13 Голобоков, М. В. Оценка достоверности результатов поверки тепловизоров Testo / М. В. Голобоков, С. Б. Данилевич // Метрология, стандартизация, управление качеством : материалы II Всерос. конф. (Омск, 19–21 апр. 2017 г.) / ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2017. – С. 11–12.

14 Голобоков, М. В. Автоматизация – эффективный путь повышения качества поверки (калибровки) средств измерений / М. В. Голобоков, С. Б. Данилевич // Метрология, стандартизация, управление качеством: теория и практика : материалы Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 14–16 нояб. 2017 г.) / ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2017. – С. 15–19.

15 Голобоков, М. В. Автоматизация расчета неопределенности поверки (калибровки) средств измерений температуры / М. В. Голобоков, С. Б. Данилевич // Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. труды 11-й науч.-

практ. конф. (Новокузнецк, 14–16 дек. 2017 г.) / СибГИУ. – Новокузнецк : Изд-во СибГИУ, 2017. – С. 325–328.

16 Голобоков, М. В. Калибровка пирометров с применением контактных эталонов температуры / М. В. Голобоков, С. Б. Данилевич // Эталонные и рабочие средства измерения температуры, теплопроводности и тепловых потоков. Мониторинг температуры и тепловых потоков грунтов в условия Крайнего Севера : материалы 16-го учебно-методического семинара совещания. (Омск, 20–21 мар. 2018 г.) – URL: <http://omsketalon.ru/materials18/> (дата обращения 03.09.2018).

17 Голобоков, М. В. Оценка неопределенности измерений при калибровке средств измерений температуры / М. В. Голобоков, С. Б. Данилевич // «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП – 2018) : труды XIV Междунар. конф. (Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г.) / НГТУ. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 3. – С. 53–57.

Автор выражает признательность **Чесноковой Татьяне Юрьевне** – кандидату физико-математических наук, старшему научному сотруднику лаборатории атмосферной абсорбционной спектроскопии Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН за консультации оказанные при написании диссертации.

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 21.09.2020. Формат $60 \times 84^{1/16}$.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 114.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, г. Новосибирск, ул. Плеханова, д. 8.