УДК 681.2.088:536.52
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-131-139
EDN: UDPJPE

А. Б. ИОНОВ
Н. С. ЧЕРНЫШЕВА
Б. П. ИОНОВ
М. А. РЯБОВА

Омский государственный технический университет, г. Омск

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОДЯНОГО ПАРА НА РЕЗУЛЬТАТЫ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Работа посвящена задаче детального исследования погрешности бесконтактных измерений температуры в диапазоне 100—600 °С, вызванной неустранимым влиянием поглощения теплового излучения объекта атмосферными парами воды в условиях промышленности. С использованием базы данных молекулярной спектроскопии HITRAN в работе было проведено моделирование четырех измерительных ситуаций, характеризующихся различными уровнями влажности и дистанциями «объект-пирометр», для 11-ти измерительных пирометрических каналов с уникальными спектральными диапазонами чувствительности. Как показало проведенное исследование, пренебрежение эффектом поглощения излучения объекта атмосферными парами воды при проведении бесконтактных температурных измерений может привести к заметному отклонению их результатов от истинных значений даже на относительно небольших дистанциях (5—10 м).

Ключевые слова: бесконтактные измерения температуры, пирометр, тепловизор, атмосферные газы, водяной пар, относительная влажность, молекулярное поглощение, база данных HITRAN.

Введение. В настоящее время развитие и внедрение общей концепции и подходов четвертой промышленной революции (Индустрии 4.0) приводит к появлению все большего числа кибер-физических систем с элементами искусственного интеллекта, что, в частности, является востребованным при организации «умных производств» [1—2]. При этом важным условием адекватного функционирования подобных комплексов и систем является использование исключительно достоверной измерительной информации при принятии решений. По этой причине в их составе целесообразно применять интеллектуальные датчики и системы, обеспечивающие автоматический контроль качества процесса измерения, в частности, за счет реализации функции метрологического самоконтроля [3—4]. Таким образом, постоянное совершенствование методов и средств измерений, их метрологического обеспечения является важной задачей, особенно если это приводит к расширению круга допустимых измерительных ситуаций (появлению возможности решения новых актуальных измерительных задач) [5].

Как известно, температура является одним из главнейших параметров, характеризующих состояние любого физического тела, в том числе и промышленного оборудования [6]. Методы пирометрии (в том числе — тепловидение) занимают особое важное место в области температурных измерений. К их основным достоинствам следует отнести быстроту, высокую чувствительность, а также отсутствие непосредственного контакта с объектом контроля, что обеспечивает возможность измерения температуры труднодоступных, жидких, сыпучих и опасных объектов [7—8]. Однако ключевым недостатком пирометрии является достаточно сильная зависимость результатов измерений от внешних факторов: состояния поверхности объекта (характеризуемого спектральным коэффициентом излучения) и состояния среды распространения излучения от объекта до термометра (наличие пыли, дождя, тумана, а также поглощение излучения атмосферными газами) [9—11].

В теоретической плоскости эффект влияния поглощения теплового излучения парами воды, входящими в состав атмосферы, на результаты бесконтактного измерения температуры известен достаточно давно [7]. Тем не менее принято считать, что подобным влиянием можно пренебречь, особенно при проведении измерений на коротких дистанциях (до 3—5 м). Поэтому в научной литературе приводятся, как правило, только краткие ориентировочные сведения об уровне данной составляющей погрешности [6, 8]. Однако предварительно проведенные исследования показывают, что в условиях промышленности этот эффект может привести к заведомо недостоверным результатам, особенно если объект находится на расстоянии 10 м и более [12—13].

Таким образом, задача детального исследования погрешности бесконтактных измерений температуры, вызванной неустранимым влиянием поглощения теплового излучения атмосферными парами воды, является актуальной. Помимо всего прочего, это позволит выработать рекомендации по построению интеллектуальных пирометров (тепловизоров) устойчивых к данному дестабилизирующему фактору.

Описание проблемы. С теоретической точки зрения, процесс бесконтактного измерения температуры может быть описан так называемой радиометрической (пирометрической) цепочкой [7], которая представляет собой модель теплового взаимодействия между объектом наблюдения (источником теплового излучения) и измерительным средством (пирометром или тепловизором) с учетом влияния внешних и внутренних дестабилизирующих факторов. Детальный теоретический анализ типовой радиометрической цепочки был проведен ранее [10—11]. Следует особо отметить, что даже в идеальных условиях зависимость между собственной температурой объекта и спектральной характеристикой его инфракрасного (теплового) излучения имеет достаточно сложный характер, подчиняясь закону Планка. Это предоставляет уникальную возможность параллельной регистрации излучения в нескольких спектральных интервалах с последующим вычислением значения температуры объекта по соотношению сигналов отдельных измерительных каналов (методы многоканальной или спектральной пирометрии) [8, 13]. Таким образом, теоретически возможно получить оценку температуры, инвариантную к ряду дестабилизирующих факторов, например — интегральному коэффициенту излучения объекта.

Как было показано выше, одним из потенциально неустранимых внешних дестабилизирующих факторов является поглощение инфракрасного излучения водяным паром, содержащимся в атмосфере. Основная сложность противодействия данному фактору связана с тем, что спектральная характеристика поглощения водяного пара имеет существенно нелинейную форму со множеством линий и полос поглощения разной ширины (рис. 1). При этом уровень поглощения (по аналогии с законом Бугера—Ламберта—Бера для растворов) зависит как от длины оптического пути между объектом и пирометром, так и от абсолютного содержания паров воды в атмосфере, что, в свою очередь, может быть определено через относительную влажность и температуру воздуха (среды) [7]. Кроме того, хорошо известно, что с ростом температуры воздуха его потенциальная влагоемкость увеличивается по экспоненциальному закону [14]. Все это свидетельствует о невозможности построения относительно простой модели учета влияния данного фактора, которая была бы адекватна реальным условиям в широких пределах [12].

В научной литературе, как правило, основной метод борьбы с влиянием поглощения водяного пара связывают с «оптимальным» выбором спектрального диапазона чувствительности приемника излучения вне основных полос поглощения паров воды [6—8]. Однако, как хорошо видно из анализа графика рис. 1, даже при проведении измерений на относительно небольших расстояниях, на соответствующей спектральной характеристике пропускания атмосферы нет достаточно широкого интервала, полностью свободного от полос поглощения

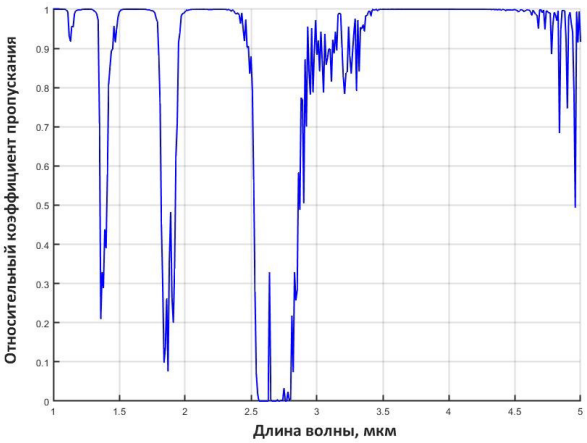

Рис. 1. Относительный коэффициент пропускания атмосферы (концентрация паров воды 11,5 г/м^3, дистанция измерения 15 м)

воды (поддиапазон 3,5...4,5 мкм также не может считаться в достаточной степени протяженным). Таким образом, применение в конструкции прибора относительно широкополосных чувствительных элементов будет автоматически приводить к возникновению дополнительной погрешности смещения. В случае же использования узкополосных приемников излучения основной проблемой становится ухудшение пороговой чувствительности, вызванное существенным уменьшением энергии сигнала по сравнению с шумами приемника излучения (отношение сигнал/шум), препятствующее качественному проведению измерений (росту неопределенности) для относительно низкотемпературных объектов [13].

Постановка задачи. Основная цель данной работы заключается в определении (путем детального моделирования) ориентировочных значений погрешности результатов бесконтактных температурных измерений, вызываемой влиянием поглощения инфракрасного излучения объекта атмосферными парами воды для диапазона температур объекта 100—600 °С в промышленных условиях. Предлагается рассмотреть 4 измерительные ситуации, каждая из которых характеризуется уникальной интенсивностью поглощения, постепенно увеличивающейся от ситуации к ситуации. Таким образом, предполагается подтвердить утверждение, высказанное в работе [12], о том, что даже на дистанциях 1—10 м нельзя игнорировать данную составляющую общей погрешности пирометрических измерений.

Достижение поставленной цели предполагает разработку модели радиометрической цепочки, качественно учитывающей эффекты молекулярного поглощения инфракрасного излучения водяным паром в различных участках спектра. Это достигается использованием базы данных HITRAN, содержащей в высокой степени адекватное описание молекулярных линий поглощения газов в ИК-диапазоне [15]. С целью выработки рекомендаций по оптимальному выбору датчиков для решения определенной измерительной задачи в работе исследуется возможность применения 11 вариантов приемников излучения, по своим параметрам соответствующих фотогальваническому элементу ФЭ-724 (производства АО «НИИ «Гириконд») [16—17] с дополнительно установленными оптическими фильтрами,

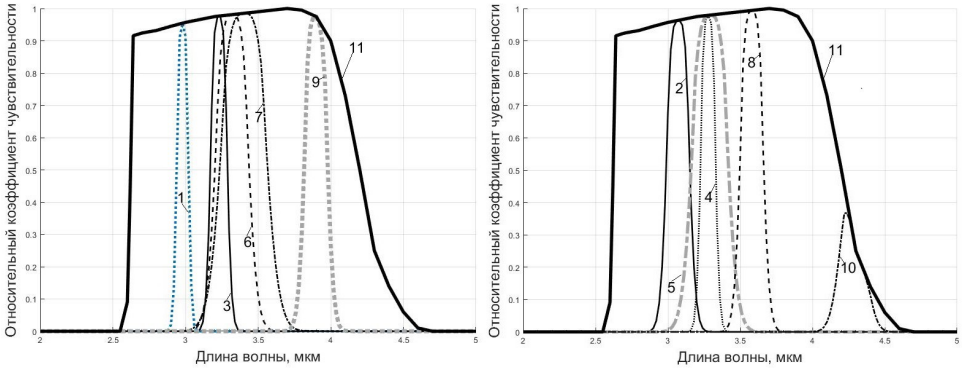

Рис. 2. Спектральные характеристики чувствительности рассматриваемых каналов регистрации излучения

формирующими 11 уникальных спектральных характеристик чувствительности.

Описание модели. Используемая в рамках данной работы, по аналогии с [18], математическая модель радиометрической цепочки базируется на следующем аналитическом выражении, позволяющем определить значение сигнала на выходе схемы обработки сигнала чувствительного элемента пирометра $s(T)$ при условии, что температура объекта равна T:

$$s(T) = K \cdot \int_{\lambda_{MIN}}^{\lambda_{MAX}} G(\lambda, T) \cdot F(\lambda, d, T_A, \varphi) \cdot D(\lambda) d\lambda + n_S, \quad (1)$$

где K — обобщенный коэффициент преобразования схемы обработки сигнала; $G(\lambda,T)$ — спектральная поверхностная плотность потока излучения объекта («черного тела»), описываемая законом Планка [7] и моделируемая в пределах диапазона длин волн от λ_{MIN} = 1 мкм до λ_{MAX} = 5 мкм; $F(\lambda,T_A,\varphi)$ — спектральная характеристика пропускания атмосферы (d — расстояние между объектом и пирометром, T_A — температура воздуха; φ — относительная влажность); $D(\lambda)$ — спектральная характеристика чувствительности приемника излучения; n_S — случайная величина (с нулевым средним значением и среднеквадратическим отклонением σ_{ns}), характеризующая собственный шум приемника излучения и системы обработки.

Как уже было упомянуто, для адекватного моделирования спектральной характеристики пропускания была использована база данных молекулярной спектроскопии HITRAN («line-by-line»), являющаяся на текущий момент всемирным стандартом для расчета и исследования эффектов пропускания атмосферными газами электромагнитного излучения в диапазоне от микроволновой до ультрафиолетовой области спектра [19]. Реализованная на ее основе в системе MATLAB модель позволяет с высокой степенью точности учесть фактор поглощения ИК-излучения объекта во всем рассматриваемом диапазоне длин волн с возможностью вариативного задания параметров радиометрической цепочки (d, T_A, φ). Четыре рассматриваемые в данном исследовании измерительные ситуации характерны для условий промышленности и различаются интенсивностью поглощения: 1) d = 2 м, T_A = 20 °C, φ = 40 % (концентрация паров воды 6,92 г/м³); 2) d = 5 м, T_A = 25 °C, φ = 50 % (концентрация паров воды 11,5 г/м³); 3) d = 15 м, T_A = 30 °C, φ = 60 % (концентрация паров воды 18,2 г/м³); 4) d = 25 м, T_A = =40 °C, φ = 75 % (концентрация паров воды 38,4 г/м³). График, изображенный на упомянутом ранее рис. 1, является иллюстрацией возможностей реализованной модели, так как был получен с ее использованием, при этом вычисленная характеристика в полной мере соответствует данным, представленным в научной литературе [6, 7, 14].

Для моделирования спектральной характеристики чувствительности приемника излучения ФЭ-724 (построенного на основе селенида свинца) были использованы экспериментальные данные, опубликованные производителем [17]. В том числе были аналитически описаны характеристики оптических фильтров, размещаемых перед датчиком и позволяющих получить 11 вариантов построения измерительных каналов со следующими областями чувствительности (по уровню 50 %): 1) 2,95...3,03 мкм; 2) 3,01...3,14 мкм; 3) 3,18...3,23 мкм; 4) 3,194...3,327 мкм; 5) 3,18...3,4 мкм; 6) 3,25...3,38 мкм; 7) 3,25...3,54 мкм; 8) 3,51...3,65 мкм; 9) 3,82...3,96; 10) 4,21...4,41; 11) 2,6...4,2 мкм. Последний из перечисленных приемник излучения (ПИ) следует считать широкополосным, остальные — узкополосными. На рис. 2 в сравнении изображены характеристики чувствительности всех рассматриваемых оптических каналов регистрации излучения.

В реальных условиях вычисление значения оценки измеряемой температуры пирометром происходит на основе предварительно определенных для конкретного прибора калибровочных характеристик, регистрируемых, как правило, в лабораторных условиях с использованием модели абсолютно черного тела (АЧТ). Аналогичным образом, для каждого из 11-ти вариантов измерительного канала была смоделирована своя уникальная калибровочная зависимость в диапазоне температур от 50 до 650 °C, при этом лабораторные условия характеризовались следующими параметрами радиометрической цепочки: d = 0,5 м; T_A = 22,5 °C; ϕ = 50 % (концентрация паров воды 10 г/м³).

Детальная экспериментальная проверка адекватности предложенной модели затруднена по причине сложности воспроизведения в лабораторных условиях большинства рассматриваемых измерительных ситуаций, но частично возможна в диапазоне температур 300 – 500 °C на небольших расстояниях. Для проведения измерений был использован пирометрический модуль в составе экспериментальной установки [20], содержащий приемник излучения с характеристиками, близкими к 11-му рассматриваемому каналу, а также АЧТ «Медея» производства ООО «НПЛ «Метропир», г. Санкт-Петербург.

Таблица 1

Сравнение результатов моделирования измерительной ситуации с результатами эксперимента

МОДЕЛИРОВАНИЕ		ЭКСПЕРИМЕНТ	
Температура объекта, °С	Расчетные показания пирометра, °С	Температура АЧТ, °С	Показания пирометра, °С
480	474,84	480 ± 0,8	475,0 ± 0,15
450	445,45	450 ± 0,8	445,3 ± 0,18
400	396,38	400 ± 0,8	395,8 ± 0,25
350	347,2	350 ± 0,8	346,9 ± 0,3
300	297,9	300 ± 0,8	297,7 ± 0,45

Оптические характеристики пирометра и конструкция АЧТ позволяют обеспечить точную фокусировку для проведения измерений с расстояний до 5 метров. При проведении эксперимента параметры радиометрической цепочки были установлены (поддерживались) следующим образом: d = 4,5 м; T_A = 27 °С; φ = 40 %; T = 300, 350, 400, 450, 480 °С. Полученные экспериментальные данные и результаты моделирования измерительной ситуации с соответствующими параметрами приведены в табл. 1, сравнительный анализ которых позволяет сделать вывод о достаточной степени адекватности предложенной модели радиометрической цепочки. Кроме того, в результате проведенного эксперимента было оценено численное значение собственного шума σ_{ns}, необходимое для последующих расчетов случайной составляющей погрешности пирометрических измерений для всех 11-ти рассматриваемых каналов.

Результаты моделирования. Основная цель моделирования заключалась в определении значения систематической погрешности (смещения) измерений, проводимых с использованием одноканального пирометра, а также ориентировочной оценке случайной ее составляющей (стандартной неопределенности) для 11-ти рассмотренных спектральных каналов регистрации излучения в условиях четырех описанных выше измерительных ситуаций при изменении температуры объекта в диапазоне от 100 до 600°С. В качестве аналитической модели радиометрической цепочки было использовано выражение (1). Исходя из общей цели исследования, влияние на результат измерения неидеальности излучательной способности поверхности объекта, а также эффекта рассеяния излучения атмосферными аэрозолями не учитывалось.

На рис. 3 приведены графики зависимости погрешности смещения от температуры объекта для 11-го (широкополосного) приемника излучения (область чувствительности: 2,6...4,2 мкм). Хорошо видно, что заметный рост данной составляющей погрешности наблюдается с увеличением T, а также с ухудшением условий измерения (при повышении концентрации водяного пара и/или увеличении расстояния от объекта до пирометра). При этом, если для первой измерительной ситуации (d = 2 м, T_A = 20 °С, φ = 40 %) значение погрешности остается в целом приемлемым (не превышает 6 °С), то в случае более сложных условий, а особенно — для четвертой измерительной ситуации (d = 25 м, T_A = 40 °С, φ = 75 %) — погрешность превышает критический уровень в 10 °С уже начиная с T = 250 °С, достигая в максимуме 52 °С (при T = = 600 °С). Это подтверждает высказанное ранее

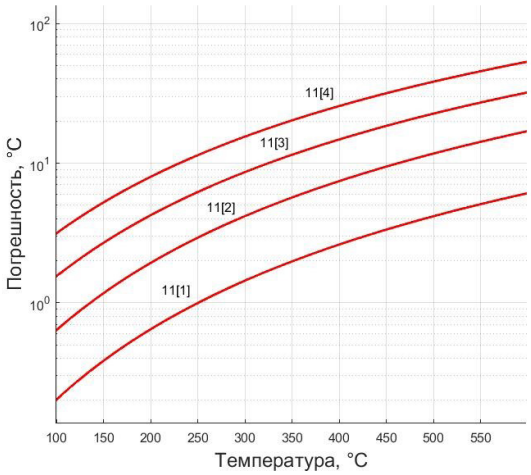

Рис. 3. Систематическая погрешность измерений (здесь и далее: число перед скобкой — номер спектральной характеристики приемника излучения, число в скобках — номер измерительной ситуации)

предположение о необходимости обязательного учета влияния эффекта поглощения излучения атмосферными газами при проведении бесконтактных температурных измерений с расстояний, больших, чем 5—10 м.

Аналогичные графики, отражающие поведение систематической составляющей погрешности для всех 11-ти рассматриваемых каналов регистрации излучения при условии четвертой измерительной ситуации, показаны на рис. 4. Обращает внимание, что у трех узкополосных приемников излучения: 8-го (3,51...3,65 мкм), 9-го (3,82...3,96 мкм) и 10-го (4,21...4,41 мкм) величина смещения остается незначительной даже при высоком уровне влажности атмосферы. Это обусловлено отсутствием в соответствующих спектральных интервалах более-менее интенсивных линий и полос поглощения паров воды. К наиболее неблагоприятным результатам приводит использование в канале регистрации излучения узкополосных приемников, спектральная характеристика чувствительности которых смещена в коротковолновую область: 1-го (2,95... 3,03 мкм); 2-го (3,01...3,14 мкм); 3-го (3,18...3,23 мкм); 4-го (3,194...3,327 мкм). Относительно приемлемые результаты демонстрирует 11-й (широкополосный) приемник излучения и 7-й узкополосный (3,25... 3,54 мкм).

Несколько иная картина наблюдается при рассмотрении погрешности смещения, проявляющейся

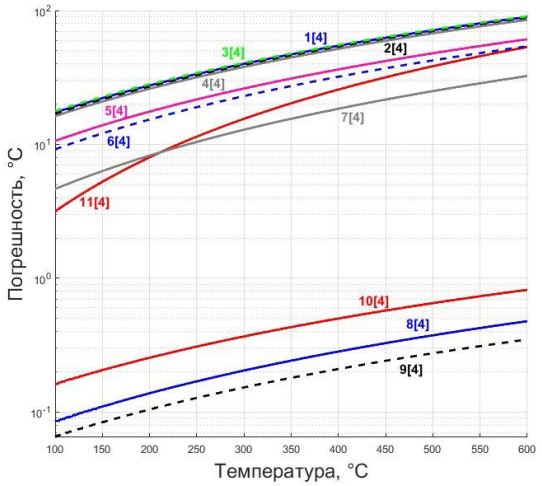

Рис. 4. Систематическая погрешность измерений в наихудших условиях (измерительная ситуация № 4)

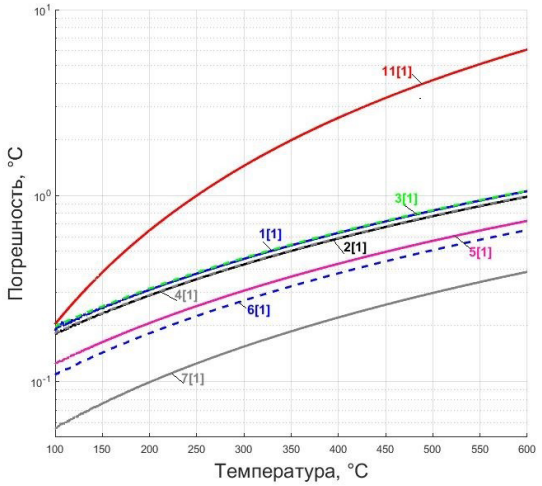

Рис. 5. Систематическая погрешность измерений в наилучших условиях (измерительная ситуация № 1)

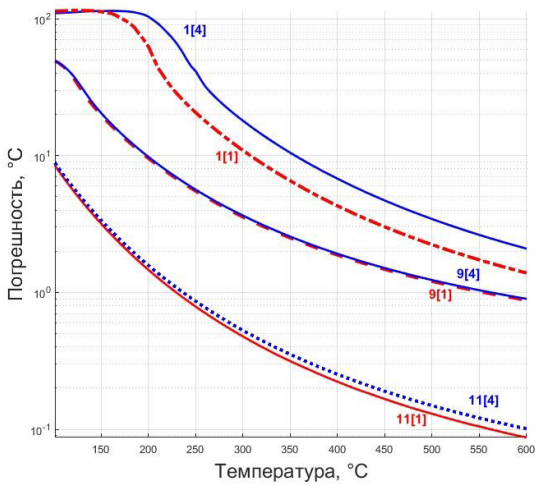

Рис. 6. Случайная погрешность измерений

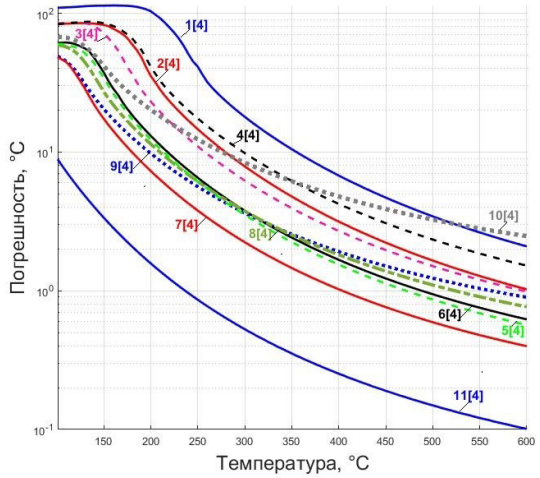

Рис. 7. Случайная погрешность измерений в наихудших условиях (измерительная ситуация № 4)

в условиях первой измерительной ситуации (рис. 5). На данном рисунке не приведены графики для 8-го, 9-го и 10-го каналов, так как расчетный уровень их погрешности минимален (не превышает 0,01 °C). В указанном случае (при условии относительно умеренного поглощения излучения водяным паром) к наибольшей погрешности смещения приводит использование широкополосного (11-го) приемника в составе измерительного канала пирометра, тогда как применение узкополосных чувствительных элементов снижает данную составляющую погрешности до уровня 1 °C и ниже. Таким образом, ухудшение условий измерения (в плане увеличения степени поглощения излучения атмосферными парами воды) в наибольшей степени отражается на измерительных каналах, содержащих узкополосные приемники, спектральные характеристики чувствительности которых расположены в области 2,9... 3,5 мкм.

Анализ погрешности пирометрических измерений оказывается неполным без исследования ее случайной составляющей (стандартной неопределенности), результаты моделирования которой в сравнении показаны на рис. 6 и рис 7. Как следует из теории, неопределенность бесконтактных температурных измерений (обусловленная в данном случае собственными шумами чувствительных элементов и системы обработки) заметно снижается с ростом температуры объекта вследствие повышения соотношения сигнал/шум. При этом стоит отметить, что для измерительных каналов с использованием 8-го, 9-го и 10-го узкополосных приемников излучения поведение неопределенности остается практически неизменным (не зависит от концентрации водяного пара), что вполне объяснимо.

Напротив — в случае применения 1-го, 2-го, 3-го и 4-го чувствительного элементов — ухудшение внешних условий приводит к заметному росту случайной составляющей погрешности («пологие» участки графиков в области температур 100—200 °C обусловлены близостью нижней границы диапазона калибровки пирометра, равной 50 °C). Для широкополосного канала регистрации излучения подобное увеличение уровня неопределенности незначительно.

Выводы по результатам моделирования. Поскольку поведение случайной и систематической составляющих погрешности измерения имеет достаточно сложный и существенно различный характер, то целесообразно по отдельности рассмотреть результаты моделирования для трех поддиапазонов

измеряемых температур объекта: 100–200 °С, 200–400 °С, 400–600 °С.

Для бесконтактных измерений температуры в нижнем поддиапазоне (100–200 °С), прежде всего, следует отметить недопустимо высокий уровень случайной составляющей погрешности при использовании узкополосных приемников излучения. Таким образом, их применение в данном случае нецелесообразно даже для проведения измерений в условиях, приближенных к лабораторным. С другой стороны, даже в самой сложной из рассматриваемых измерительных ситуаций погрешность смещения для широкополосного измерительного канала не превышала 5–8 °С, что свидетельствует о его оптимальности для данного поддиапазона измеряемых температур.

Верхний поддиапазон (400–600 °С), напротив, характеризуется низким уровнем случайной составляющей погрешности для всех рассмотренных датчиков. В этом случае, наиболее целесообразным выглядит использование узкополосных приемников излучения № 8 и № 9, спектральная характеристика чувствительности которых лежит в области, свободной от полос поглощения воды. Их общая погрешность не превышает 2,5 °С даже в самой сложной измерительной ситуации. Тогда как применение широкополосного измерительного канала может привести к заведомо недостоверным результатам при уровне относительной влажности воздуха выше 50% и дистанции измерений более 5–10 м.

Особое внимание привлекают полученные результаты для диапазона измеряемых температур 200–400 °С, для которого однозначно оптимального решения по построению одноканального пирометра найти не удается. Недостатком использования узкополосных приемников № 8 и № 9 является достаточно высокий уровень случайной погрешности (до 10–12 °С), а применение широкополосных чувствительных элементов приводит к значительному росту погрешности смещения в сложных условиях (до 20-25°С). Потенциально компромиссный вариант (датчик № 7) также не является удачным решением по причине сильной зависимости показаний от условий измерения. Таким образом, более-менее качественные результаты в этом поддиапазоне можно получить только при проведении измерений в условиях, приближенных к лабораторным, или при использовании специализированных алгоритмов усреднения, что значительно ограничивает круг решаемых практических задач. Очевидно, что в данном случае следует подробно рассмотреть возможность построения измерительных приборов с несколькими параллельными каналами регистрации излучения.

При использовании узкополосных приемников излучения, помимо рассмотренного выше влияния паров воды, в обязательном порядке нужно учитывать полосы поглощения других атмосферных газов, концентрация которых, особенно в промышленных условиях, может быть весьма заметной. Прежде всего это касается оксидов углерода CO и CO_2, озона, углеводородов и т.д.

Заключение. Как показало проведенное исследование, пренебрежение эффектом поглощения излучения объекта атмосферными парами воды при проведении бесконтактных температурных измерений может привести к заметному отклонению их результатов от истинных значений даже на относительно небольших дистанциях (5–10 метров). Реализованные в современных приборах (тепловизорах и пирометрах) модели компенсации влияния данного фактора не являются качественным решением проблемы (особенно в сложных нестационарных промышленных условиях), так как их адекватное использование постоянно требует от оператора точных и достоверных данных о текущем состоянии параметров атмосферы. Построение одноканальных пирометров на базе узкополосных датчиков, область чувствительности которых лежит в диапазоне, свободном от полос поглощения паров воды, также не может быть признано удачным решением из-за ухудшения соотношения сигнал/шум, а также потенциального влияния на их показания других газов, содержащихся в атмосфере. В этой связи перспективным, на наш взгляд, является развитие концепции автоматического контроля условий измерения за счет создания информационной избыточности путем формирования в пирометрах дополнительных каналов регистрации излучения.

Библиографический список

1. Lu Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues // Journal of Industrial Information Integration. 2017. Vol. 6. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.jii.2017.04.005.

2. Huang Z., Shen Y., Li J., Fey M., Brecher C. AI-Driven Digital Twins. Sensors. 2021. Vol. 21, no. 6340. P. 1–35. DOI: 10.3390/s21196340.

3. Taymanov R., Pronin A., Sapozhnikova K. [et al.]. Actual measuring technologies of Industry 4.0 and analysis of their realization experience. Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1379, no. 012049. P. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/1379/1/012049.

4. Sapozhnikova K., Pronin A., Taymanov R. Increasing Measurement Trustworthiness as a Necessary Part of Technology Development // Sensors & Transducers. 2021. Vol. 251, Issue 4. P. 61–69.

5. Taymanov R., Sapozhnikova K., Prokopchina S. What is immeasurable make measurable with artificial intelligence (measurements & artificial intelligence) // Measurement: Sensors. 2021. Vol. 18, no. 100316. P. 1–4. DOI: 10.1016/j.measen.2021.100316.

6. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. Москва: ИД Спектр, 2009. 544 с. ISBN 978-5-904270-05-6.

7. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с фр. Москва: Мир, 1988. 416 с. ISBN 5-03-000915-9.

8. Zang Z. M., Tsai B. K., Machin G. Radiometric Temperature Measurements: I. Fundamentals. Vol. 42. Experimental Methods in the Physical Sciences. Publisher: Academic Press, 2009. 376 p.

9. Chernysheva N. S., Ionov A. B., Ionov B. P. The Main Principles of Development of an Intelligent Multi-Channel Radiation Thermometer // 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), June 29–July 03, 2020. Chemal, Russia, 2020. P. 226–233. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153495.

10. Чернышева Н. С., Ионов Б. П., Ионов А. Б. Диагностика измерительной ситуации при бесконтактных измерениях температуры в сложных условиях // Омский научный вестник. 2016. № 6 (150). С. 147–151.

11. Ionov A. B. Metrological Problems of Pyrometry: an Analysis and the Prospects for Solving Them // Measurement Techniques. 2013. Vol. 56, no. 6. P. 658–663.

12. Minkina W., Klecha D. Atmospheric transmission coefficient modelling in the infrared for thermovision measurements // J. Sens. Sens. Syst. 2016. Vol. 5. P. 17–23. DOI: 10.5194/jsss-5-17-2016.

13. Ионов А. Б. Синтез малоканальных систем пирометрического мониторинга объектов с температурой 200...800 °С // Мир измерений. 2012. № 10 (140). С. 42–47.

14. Тимофеев Ю. М., Васильева А. В. Теоретические основы атмосферной оптики. Санкт-Петербург: Наука, 2003. 474 с. ISBN 5-02-024976-9.

15. Gordon I. E., Rothman L. S., Hill C. [et al.] The HITRAN2016 molecular spectroscopic database // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2016. Vol. 203. P. 3—69. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.06.038.

16. Пат. 2261502 Российская Федерация, МПК H 01 L 33/00, 31/101, 31/12. Фотолюминесцентный излучатель, полупроводниковый фотоэлемент и оптрон на их основе / Горбунов Н. И., Варфоломеев С. П., Дийков Л. К., Марахонов В. М., Медведев Ф. К. № 2004104374/28, заявл. 05.02.04; опубл. 27.09.05, Бюл. № 27.

17. Анисимова Н. П., Кулагов В. Б., Луганский Ю. М. Промышленные низкотемпературные пирометры спектрального отношения // Прикладная физика. 2015. № 6. С. 83—86.

18. Minkina W., Dudzik S. Infrared Thermography. Errors and Uncertainties. New York: John Wiley & Sons, 2009. 212 p. ISBN 978-0-470-74718-6.

19. Фомин Б. А., Колокутин Г. Э. Новая спектроскопическая база HITRAN-2016 в полинейных моделях, применяемых в дистанционном зондировании Земли методами инфракрасной спектрометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 1. С. 17—24.

20. Чернышева Н. С., Ионов Б. П., Ионов А. Б. Экспериментальная установка для изучения влияния запыленности на бесконтактные измерения температуры // Омский научный вестник. 2018. № 2 (158). С. 110—115. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-110-115.

ИОНОВ Антон Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.
SPIN-код: 5647-6944
AuthorID (РИНЦ): 518556
ORCID: 0000-0002-4538-6627
AuthorID (SCOPUS): 55899469100
Адрес для переписки: antionov@mail.ru

ЧЕРНЫШЕВА Надежда Сергеевна, аспирант кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.
SPIN-код: 7451-4970
AuthorID (РИНЦ): 909195
ORCID: 0000-0002-6160-7864
Author ID (SCOPUS): 56211164700
Адрес для переписки: wia_lady@mail.ru

ИОНОВ Борис Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики» ОмГТУ, г. Омск.
SPIN-код: 8118-3805
AuthorID (РИНЦ): 685217
AuthorID (SCOPUS): 6603024036
Адрес для переписки: bion_rtu@mail.ru

РЯБОВА Мария Анатольевна, магистрант гр. ПРм-211 факультета элитного образования и магистратуры ОмГТУ, г. Омск.
Адрес для переписки: mariaa_ryabova@mail.ru

Для цитирования

Ионов А. Б., Чернышева Н. С., Ионов Б. П., Рябова М. А. Оценка влияния атмосферного водяного пара на результаты бесконтактного измерения температуры // Омский научный вестник. 2023. № 3 (187). С. 131—139. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-131-139.

Статья поступила в редакцию 26.05.2023 г.
© А. Б. Ионов, Н. С. Чернышева, Б. П. Ионов, М. А. Рябова

UDK 681.2.088:536.52
DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-131-139
EDN: UDPJPE

A. B. IONOV
N. S. CHERNYSHEVA
B. P. IONOV
M. A. RYABOVA

Omsk State
Technical University,
Omsk, Russia

SIMULATION OF THE EFFECT OF ABSORPTION BY ATMOSPHERIC WATER VAPOR ON THE RESULTS OF NON-CONTACT TEMPERATURE MEASUREMENTS

The article investigates the effect of atmospheric water vapor on the results of non-contact temperature measurements carried out in the range from 100 to 600 °C. It is known that the key disadvantage of radiation thermometry is a rather strong dependence of the measurement results on external factors: the state of the surface of the object, as well as the state of the environment for the propagation of radiation from the object to the thermometer. Water vapor constantly present in the atmosphere selectively absorbs the infrared radiation of the object, which leads to underestimation of the results. This effect depends on the humidity and temperature of the air, as well as on the distance between the object and the radiation thermometer. On the basis of the simulation performed using the MATLAB system and the HITRAN molecular spectroscopy database, the values of random and systematic errors are calculated for four measurement situations typical of industrial conditions that differ in the level of absorption by water vapor. Eleven variants of radiation receivers with unique spectral sensitivity characteristics are studied. It is shown that the effect of absorption of the infrared radiation of an object by water vapor can lead to a significant decrease in the reliability of measurements carried out even at short distances.

Keywords: non-contact temperature measurements, radiation thermometer, thermographic camera, water vapor, relative humidity, molecular absorption, HITRAN database.

References

1. Lu Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues // Journal of Industrial Information Integration. 2017. Vol. 6. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.jii.2017.04.005. (In Engl.).

2. Huang Z., Shen Y., Li J., Fey M., Brecher C. AI-Driven Digital Twins. Sensors. 2021. Vol. 21, no. 6340. P. 1–35. DOI: 10.3390/s21196340. (In Engl.).

3. Taymanov R., Pronin A., Sapozhnikova K. [et al.]. Actual measuring technologies of Industry 4.0 and analysis of their realization experience. Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1379, no. 012049. P. 1–8. DOI: 10.1088/1742-6596/1379/1/012049. (In Engl.).

4. Sapozhnikova K., Pronin A., Taymanov R. Increasing Measurement Trustworthiness as a Necessary Part of Technology Development // Sensors & Transducers. 2021. Vol. 251, Issue 4. P. 61–69. (In Engl.).

5. Taymanov R., Sapozhnikova K., Prokopchina S. What is immeasurable make measurable with artificial intelligence (measurements & artificial intelligence) // Measurement: Sensors. 2021. Vol. 18, no. 100316. P. 1–4. DOI: 10.1016/j.measen.2021.100316. (In Engl.).

6. Vavilov V. P. Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol' [Infrared thermography and thermal control]. Moscow, 2009. 544 p. ISBN 978-5-904270-05-6. (In Russ.).

7. Gossorg Zh. Infrakrasnaya termografiya. Osnovy, tekhnika, primenenie: per. s frants [Infrared thermography. Fundamentals, technique, application: trans. from French]. Moscow, 1988. 416 p. ISBN 5-03-000915-9. (In Russ.).

8. Zang Z. M., Tsai B. K., Machin G. Radiometric Temperature Measurements: I. Fundamentals. Vol. 42. Experimental Methods in the Physical Sciences. Publisher: Academic Press, 2009. 376 p. (In Engl.).

9. Chernysheva N. S., Ionov A. B., Ionov B. P. The Main Principles of Development of an Intelligent Multi-Channel Radiation Thermometer // 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), June 29–July 03, 2020. Chemal, Russia, 2020. P. 226–233. DOI: 10.1109/EDM49804.2020.9153495. (In Engl.).

10. Chernysheva N. S., Ionov B. P., Ionov A. B. Diagnostika izmeritel'noy situatsii pri beskontaktnykh izmereniyakh temperatury v slozhnykh usloviyakh [Diagnosis of the difficult measuring situation of non-contact temperature measurements] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin.* 2016. № 6 (150). P. 147–151. (In Russ.).

11. Ionov A. B. Metrological Problems of Pyrometry: an Analysis and the Prospects for Solving Them // Measurement Techniques. 2013. Vol. 56, no. 6. P. 658–663. (In Engl.).

12. Minkina W., Klecha D. Atmospheric transmission coefficient modeling in the infrared for thermovision measurements // J. Sens. Sens. Syst. 2016. Vol. 5. P. 17–23. DOI: 10.5194/jsss-5-17-2016. (In Engl.).

13. Ionov A. B. Sintez malokanal'nykh sistem pirometricheskogo monitoringa ob"yektov s temperaturoy 200...800°S [Synthesizing low-channel systems for pyrometrical monitoring of items at a temperature of 200 to 800°C] // Mir izmereniy. *Measurements World.* 2012. No. 10 (140). P. 42–47. (In Russ.).

14. Timofeyev Yu. M., Vasil'yeva A. V. Teoreticheskiye osnovy atmosfernoy optiki [Theoretical Foundations of Atmospheric Optics]. Saint Petersburg, 2003. 474 p. ISBN 5-02-024976-9. (In Russ.).

15. Gordon I. E., Rothman L. S., Hill C. [et al.] The HITRAN2016 molecular spectroscopic database // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2016. Vol. 203. P. 3–69. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2017.06.038. (In Engl.).

16. Patent 2261502 Russian Federation, IPC H 01 L 33/00, 31/101, 31/12. Fotolyuminestsentnyy izluchatel', poluprovodnikovyy fotoelement i optron na ikh osnove [Photoluminescent emitter, semiconductor element and optron based on Said devices] / Gorbunov N. I., Varfolomeev S. P., Dijkov L. K., Marakhonov V. M., Medvedev F. K. No. 2004104374/28. (In Russ.).

17. Anisimova N. P., Kulagov V. B., Luganskiy Yu. M. Promyshlennyye nizkotemperaturnyye pirometry spektral'nogo otnosheniya [Industrial especially low-temperature color pyrometers] // Prikladnaya fizika. *Applied Physics.* 2015. No. 6. P. 83–86. (In Russ.).

18. Minkina W., Dudzik S. Infrared Thermography. Errors and Uncertainties. New York: John Wiley & Sons, 2009. 212 p. ISBN 978-0-470-74718-6. (In Engl.).

19. Fomin B. A., Kolokutin G. E. Novaya spektroskopicheskaya baza HITRAN-2016 v polineynykh modelyakh, primenyayemykh v distantsionnom zondirovanii Zemli metodami infrakrasnoy spektrometrii [New HITRAN-2016 spectroscopic database for line-by-line models used in remote sensing of the earth by infrared spectrometry] // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space.* 2019. Vol. 16, no. 1. P. 17–24. (In Russ.).

20. Chernysheva N. S., Ionov B. P., Ionov A. B. Eksperimental'naya ustanovka dlya izucheniya vliyaniya zapylennosti na beskontaktnyye izmereniya temperatury [Experimental setup for studying the effect of dustiness in case of non-contact temperature measurements] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin.* 2018. No. 2 (158). P. 110–115. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-158-110-115. (In Russ.).

IONOV Anton Borisovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Radio Devices and Diagnostic Systems Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
SPIN-code: 5647-6944
AuthorID (RSCI): 518556
ORCID: 0000-0002-4538-6627
AuthorID (SCOPUS): 55899469100
Correspondence address: antionov@mail.ru

CHERNYSHEVA Nadezhda Sergeyevna, Graduate Student of Radio Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.
SPIN-code: 7451-4970
AuthorID (RSCI): 909195
ORCID: 0000-0002-6160-7864
Author ID (SCOPUS): 56211164700
Correspondence address: wia_lady@mail.ru

IONOV Boris Petrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Radio Devices and Diagnostic Systems Department, OmSTU, Omsk.
SPIN-code: 8118-3805
AuthorID (RSCI): 685217.
AuthorID (SCOPUS): 6603024036
Correspondence address: bion_rtu@mail.ru

RYABOVA Mariya Anatolyevna, Undergraduate gr. PRm-211 of Elite Education and Magistracy Faculty, OmSTU, Omsk.
Correspondence address: mariaa_ryabova@mail.ru

For citations

Ionov A. B., Chernysheva N. S., Ionov B. P., Ryabova M. A. Simulation of the effect of absorption by atmospheric water vapor on the results of non-contact temperature measurements // Omsk Scientific Bulletin. 2023. No. 3 (187). P. 131–139. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-187-131-139.

Received May 26, 2023.
© A. B. Ionov, N. S. Chernysheva, B. P. Ionov, M. A. Ryabova