

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ НА БЕСКОНТАКТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

В статье представлена лабораторная установка для изучения влияния запыленности среды распространения излучения на бесконтактные измерения температуры. Наличие в реальных промышленных условиях нестационарного пылевого облака между объектом и прибором инфракрасного теплового контроля является существенным фактором, вызывающим дополнительную погрешность, которая значительно искажает результаты измерений. Приведены результаты экспериментального моделирования базовых состояний пылевого облака клинкерной пыли и выделены наиболее информативные признаки оценки этих состояний на примере использования пятиканального пирометра со спектральным разделением каналов и оптического пылемера. Показано, что предложенная экспериментальная установка позволяет адекватно моделировать различные ситуации запыленного состояния пространства между прибором бесконтактного контроля температуры и объектом измерения.

Ключевые слова: бесконтактные измерения температуры, пылевое облако, пылемер оптический, коэффициент пропускания.

Появление относительно недорогих приемников инфракрасного излучения для спектрального диапазона от 0,8 до 14 мкм предопределило достаточно бурное развитие техники бесконтактных температурных измерений и появления на рынке большого парка приборов данного класса — пирометров и тепловизоров [1]. Однако в последние годы ажиотажный интерес к подобным приборам стал спадать, поскольку, наряду с очевидными преимуществами, стали проявляться недостатки бесконтактных измерений, связанные с влиянием внешних, в том числе нестационарных, факторов на процесс измерения [2]. В результате получили распространение приборы, ориентированные на конкретный объект контроля (стекло, алюминиевые сплавы и т.д.) и подходящие для использования только в конкретной измерительной ситуации [3, 4]. Данное решение оправданно, если условия проведения измерений остаются практически неизменными. Для случая, когда влияние внешних факторов не является стационарным, необходимо использовать другие методы, в частности, многоканальную спектральную пирометрию [5]. Спектральный подход выглядит гораздо более универсальным, поскольку наличие информационной избыточности в данных, получаемых многоканальным спектральным прибором, в совокупности с возможным использованием априорной информации о характере влияния различных внешних факторов на процесс измерения, потенциально позволяет существенно снизить неопределенность оценки температуры [6].

В связи с вышесказанным получение априорных сведений о влиянии внешних факторов на процесс пирометрических и тепловизионных измерений является актуальной исследовательской задачей. Для измерительных тепловизоров, помимо снижения неопределенности температурных измерений, дополнительно возникает задача улучшения зрительного восприятия теплового поля объекта при наличии помех [7, 8].

Одним из важнейших воздействий, влияющих на неопределенность результата бесконтактных температурных измерений, является запыленность пространства между объектом контроля и измерительным прибором (пирометром или тепловизором). Модель взаимодействия представляется коэффициентом пропускания среды, который совместно с коэффициентом излучения объекта в виде общего приведенного корректирующего (компенсирующего) коэффициента интерактивно вводится оператором в прибор при начале измерений. Сложность компенсации влияния данного фактора заключается в том, что пылевое облако в реальных условиях существенно нестационарно, т.е. непрерывно изменяет свои характеристики во времени и пространстве. В результате эффективность ручной интерактивной коррекции сводится на нет, а для реализации и проверки автоматических методов компенсации имеющихся сведений недостаточно. Теоретические и экспериментальные исследования, связанные с влиянием аэрозолей и взвесей на распространение оптического излуче-

ния по большей части относятся к видимому диапазону длин волн и направлены на оценку метеорологической дальности видимости. Теоретически это представляется моделями рэлеевского и Ми рассеяния [9]. Сложность моделирования определяется существенной зависимостью коэффициента рассеяния от состава и размеров частиц пылевого облака. С другой стороны, экспериментальный подход позволяет феноменологически оценить коэффициент пропускания, как параметр взаимодействия пылевой среды и излучения, причем экспериментальное моделирование может быть проведено для реально состава пылевого облака.

В настоящей работе рассматривается первый этап решения проблемы получения априорных сведений о влиянии внешних факторов на процесс пирометрических измерений — построение экспериментальной установки формирования облака клинкерной пыли и определение базовой совокупности наиболее информативных параметров процесса, которые могут быть использованы для исследования влияния данной среды при пирометрических и тепловизионных измерениях на технологических установках цементной промышленности, а также для разработки методов компенсации этого влияния.

Прежде всего, интерес представляет реальное поведение коэффициента пропускания, как параметра модели взаимодействия ИК излучения со средой, при изменении условий эксперимента. Требуется определить возможность воспроизведения базового набора состояний, которые могут быть использованы в дальнейшем для оценки неопределенности измерений, разработки и тестирования методов автоматической компенсации. Под базовым набором состояний понимается:

- стационарное состояние относительно постоянного коэффициента пропускания, в том числе различные значения (неизвестные априори) постоянного за время измерений коэффициента пропускания;
- существенно нестационарное поведение коэффициента пропускания, вызванное локальными турбулентностями пылевого облака;
- нестационарное состояние, вызванное плавным изменением коэффициента пропускания.

Представленные выше задачи определили способ построения экспериментальной установки. Наиболее подходящей и приближенной к реальным условиям, с нашей точки зрения, является система аналогичная по своей реализации фотометрическим системам (рис. 1). Специфика задачи определяет её некоторые особенности:

- кювета (пылевая камера), в которой происходит взаимодействие проходящего излучения

с пылью, должна иметь достаточный объем для обеспечения формирования нестационарного пылевого облака;

- в пылевой камере требуется предусмотреть эффективный способ формирования пылевого облака с характеристиками, приближенными к имеющим место на практике;

- пылевая камера должна быть герметичной, оборудованной входными и выходными окнами, прозрачными в достаточно широкой инфракрасной области спектра (0,6 ...14 мкм). Это необходимо для обеспечения возможности проведения испытаний влияния пыли на пирометры и тепловизоры, работающие в окнах прозрачности атмосферы 8...14 мкм, 3...5 мкм, 0,9...1,1 мкм, а также на приборы, использующие другие участки спектра в указанном выше диапазоне;

- в качестве источника излучения используется модель абсолютно черного тела (АЧТ). Рабочие характеристики АЧТ (диапазон температур, апертура, положение оптической оси излучения) должны быть согласованы как с характеристиками пылевой камеры, так и с характеристиками пирометрического прибора, влияние на результат измерений которого предстоит исследовать;

- в состав установки должна входить система измерения концентрации пыли (пылемер), обеспечивающая измерение параметров пылевого облака синхронно и независимо от пирометрических измерений;

- необходимо предусмотреть механизм (возможность) регулярного устранения излишней (паразитной) запыленности входного и выходного окна для устранения дополнительной составляющей погрешности.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2.

В ее состав входят:

- пылевая камера (1); входные окна (2), выходные окна (3), защищенный (опорный) отсек пылемера (4), вентиляторы создания пылевого облака (5);
- элементы двулучевого пылемера (6,7): полупроводниковый лазер (8); светоделитель (9),



Рис. 1. Обобщенная структурная схема фотометрической системы

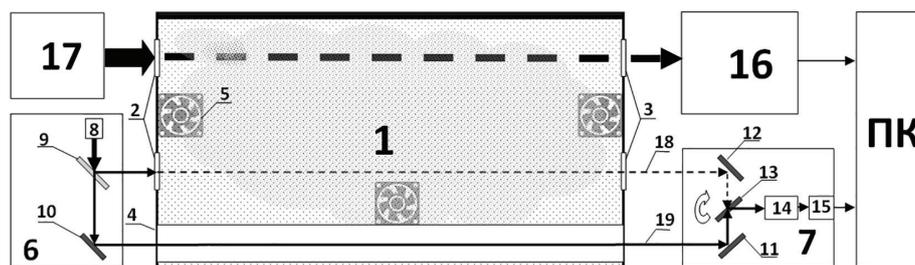


Рис. 2. Схема лабораторной установки для изучения влияния запыленности на бесконтактные температурные измерения

отражающие зеркала (10, 11, 12), вращающееся зеркало оптического модулятора (13), приемник излучения (14), модуль регистрации и передачи данных (15);

— пятиканальный пирометрический модуль (16);

— модель абсолютно черного тела (17).

Пылевая кювета, представляющая собой камеру размерами 43×40×35 см со съёмной верхней крышкой, оборудована входными и выходными окнами, а также отделенным от остального пространства камеры опорным (свободным от пыли) каналом двулучевого оптического пылемера. Внутри камеры размещены три вентилятора, обеспечивающие эффективное формирование нестационарного пылевого облака. Мерное количество клинкерной пыли размещается в камере перед началом испытаний.

Среди методов измерения концентрации пыли наибольшее распространение в настоящее время получили гравиметрический и, в особенности, оптический [10]. Сущность оптического подхода заключается в измерении коэффициента пропускания (оптической плотности) или коэффициента рассеяния оптического излучения пылевым облаком на фиксированном расстоянии. Другими словами, по своему принципу действия оптические пылемеры представляют собой фотометры с градуировкой в единицах оптической плотности, которой ставится в соответствие концентрация пыли в конкретных условиях. Примерами таких устройств являются, например, приборы серии DUSTHUNTER [11]. Однако чаще всего пылемеры промышленного исполнения регистрируют усредненное значение концентрации пыли, причем существенно изменить время усреднения не всегда представляется возможным.

Учитывая особенности поставленной задачи (отсутствие необходимости обеспечить абсолютное измерение концентрации пыли и, напротив, необходимость отслеживать динамику), данная проблема может быть решена путем построения экспериментального пылемера, реализованного по схеме двулучевого фотометра, с измерением отношения оптического пропускания в измерительном канале (18, рис. 2) к пропусканию в защищенном от пыли опорном канале (19, рис. 2). При подобном построении оптической схемы влияние дополнительных внешних факторов, таких как, температура окружающей среды, нестабильность источника питания излучателя и т.п., на излучатель и приемник излучения пылемера оказывается скомпенсированным. Реализованный в рамках настоящей работы экспериментальный пылемер конструктивно состоит из излучателя на основе полупроводникового лазера (640 нм) с системой деления светового потока (6, рис. 2) и блока регистрации (7, рис. 2), размещенных на общей оптической скамье с пылевой камерой и АЧТ.

Защитные окна пылевой камеры выполнены из селенида цинка (ZnSe). Область спектрального пропускания (0,5–22 мкм) и отсутствие заметных полюсов поглощения в интересующем нас спектральном диапазоне (0,6–14 мкм) предопределили выбор данного материала.

В качестве приемника излучения инфракрасного диапазона при проведении экспериментов используется пятиканальный пирометрический модуль со спектральным разделением каналов ($\lambda_1 = 1,6...3,6$; $\lambda_2 = 2,6...4,5$; $\lambda_3 = 2,9...3,05$; $\lambda_4 = 3,51...3,65$; $\lambda_5 = 4,19...4,4$, мкм). Данный модуль может функционировать

как в радиометрическом (по потоку излучения), так и в пирометрическом (по температуре) режиме измерения.

Это позволяет оценить первичное воздействие пылевого облака на поток излучения от объекта (АЧТ), а также экспериментальным путем установить влияние запыленной среды на возрастание неопределенности бесконтактной оценки температуры.

Диапазон рабочих температур модели АЧТ (300–900 °С) определяется рабочим диапазоном измеряемых температур пятиканального спектрально-пирометрического модуля.

Предлагаемый способ испытаний предполагает экспериментальное оценивание коэффициента пропускания среды в пяти спектральных поддиапазонах, соответствующих пяти каналам пирометрического модуля, с последующим сравнением полученных данных с параллельно регистрируемыми показаниями пылемера. Общий процесс испытаний является совокупностью стадий измерений, производимых при различной интенсивности и, соответственно, уникальном спектральном составе потока инфракрасного излучения для различных температур АЧТ.

Проведенные первичные испытания показали, что проблема, связанная с неконтролируемым запылением входных и выходных окон пылевой камеры, является весьма существенной, так как приводит к возникновению дополнительной погрешности при определении характеристик пылевого облака. Для минимизации влияния данного явления была предложена трехэтапная процедура измерений:

1) цикл измерений при отсутствии пылевого облака (входные и выходные окна предварительно очищаются механически);

2) цикл измерений в активной фазе пылевого облака (вентиляторы создают пылевое облако внутри камеры, после чего производится цикл измерений; в этот период пыль постепенно оседает на стенках камеры и защитных стеклах);

3) цикл измерений после выключения вентиляторов и оседания основной части пыли (производится оценка остаточной запыленности инфракрасного канала).

Каждый этап описываемой измерительной процедуры (цикл измерений), заключается в одновременной регистрации: а) инфракрасного излучения АЧТ пирометром (его пятью каналами) в радиометрическом и пирометрическом режиме; б) излучения лазера приемным блоком пылемера. Для повышения статистической устойчивости результатов за один цикл в каждом измерительном канале проводилась последовательная регистрация нескольких массивов мгновенных значений с интервалом 0,1...1 с. Все данные, получаемые с пятиканального пирометра и пылемера пересылаются на персональный компьютер (ПК), где проходят статистическую обработку.

В рамках исследований, описываемых в данной статье, статистическая обработка результатов измерений проводилась с целью минимизации влияния внешних шумов и помех на вычисляемые информационные параметры (показатели). К основным показателям были отнесены:

— оценка (пять альтернативных показателей) степени ослабления инфракрасного излучения при его прохождении через сформированное пылевое облако в поддиапазонах, соответствующих пяти датчикам пирометра;

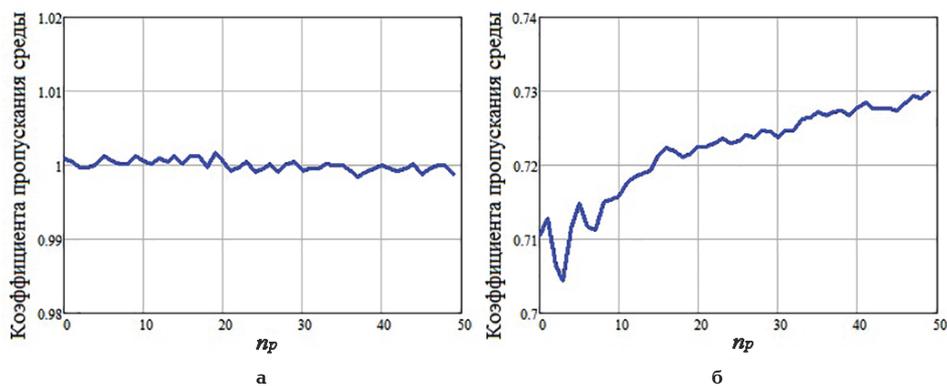


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропускания среды пылевой камеры на первом (а) и на третьем этапе измерений (остаточной запыленности) (б) от номера измерения первого канала пирометрического модуля

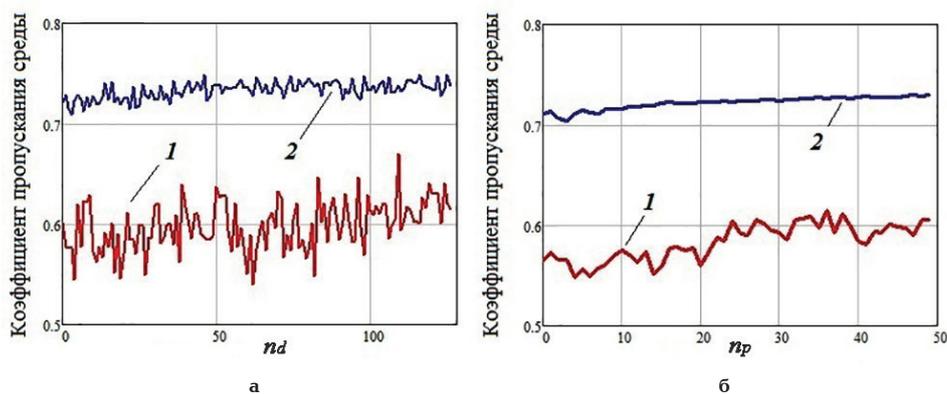


Рис. 4. Зависимость коэффициента пропускания пылевого облака (1) и остаточной запыленности (2) от номера измерения пылемера (а) и номера измерения первого канала пирометрического модуля (б)

— оценка коэффициента пропускания среды пылемером;

— показатель достоверности (дисперсия) указанных выше оценок, определяемая на основе разброса мгновенных значений, соответствующих текущему циклу измерений.

Оцениваемое с помощью пирометрического модуля мгновенное i -е значение коэффициента спектрального пропускания нестационарной запыленной среды (для интервала длин волн соответствующего диапазону спектральной чувствительности каждого приемника излучения) можно определить на основе выражения [12]:

$$\tau_i(\lambda) = I_i(\lambda) / I_0(\lambda),$$

где $I_0(\lambda)$ — интенсивность излучения в точке приема для начального состояния пылевой камеры (результат измерений этапа 1); $I_i(\lambda)$ — мгновенное значение интенсивности излучения в точке приема для активной фазы пылевого облака (результат измерений этапа 2) или фазы остаточной запыленности (результат измерений этапа 3). Таким образом, оценка коэффициента пропускания может быть получена путем многократных косвенных измерений. При этом следует отметить, что используемая экспериментальная установка не позволяет обеспечить полной воспроизводимости измерений коэффициента пропускания среды. Это объясняется постоянным изменением внешних и внутренних условий эксперимента: нестационарность пылевого облака

каждый раз проявляется уникальным образом; невозможно обеспечить одинаковую степень очистки защитных стекол; наблюдается постоянное уменьшение количества активной части пыли из-за ее паразитного оседания и прилипания к стенкам камеры и т.п. Кроме того, следует ожидать некоторое расхождение в показаниях пылемера и пирометра вследствие того, что в предложенной конструкции оптические оси пучков данных устройств геометрически разнесены, имеют свои входные и выходные окна и взаимодействуют с различными участками пылевого облака.

Основные результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 3–7.

На рис. 3 и рис. 4 приведены временные зависимости коэффициента пропускания для различных стадий процесса измерения, которые наглядно демонстрируют возможности предложенной экспериментальной установки по воспроизведению существенно различных состояний коэффициента пропускания пылевого облака: стационарное состояние относительно постоянного коэффициента пропускания при отсутствии пылевого облака (рис. 3а) и после полного оседания пыли (асимптота, для рис. 3б); существенно нестационарное состояние (значение) коэффициента пропускания, вызванное локальными турбулентностями пылевого облака (рис. 4а); нестационарное состояние, характеризующееся плавным изменением коэффициента пропускания (рис. 4б). Представленные результаты соответствуют одному циклу измерений (при

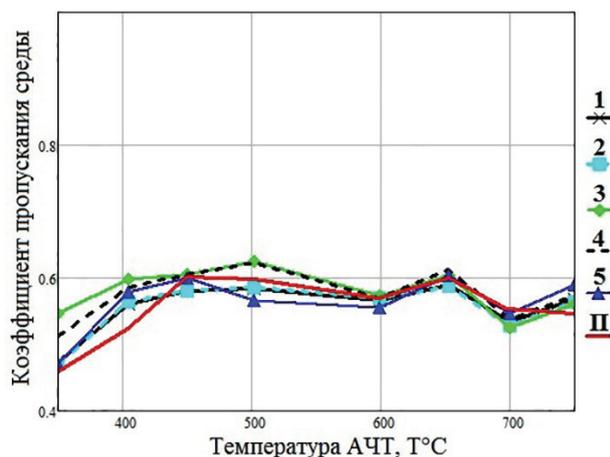


Рис. 5. Усредненное значение коэффициента пропускания среды пылевой камеры на стадии активного пылевого облака, где 1–5 — данные каналов пирометрического модуля; П — данные пылемера

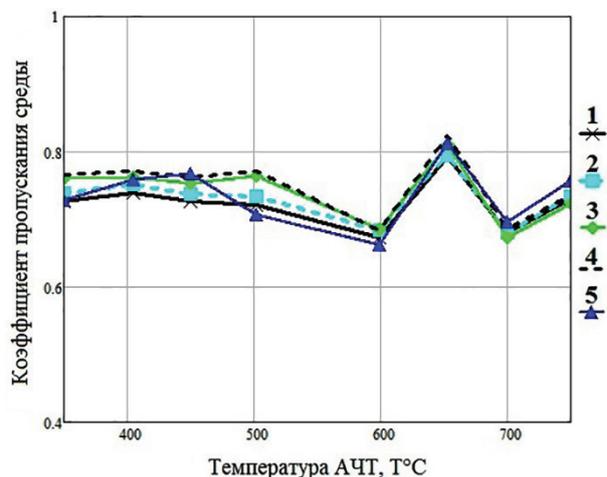


Рис. 6. Усредненное значение коэффициента пропускания среды пылевой камеры на стадии осаждения пыли, где 1–5 — данные всех каналов пирометрического модуля

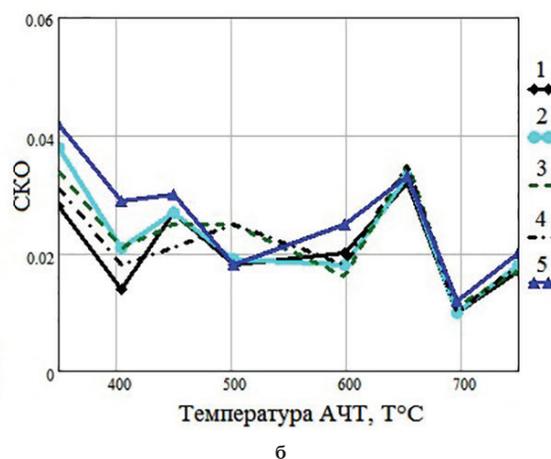
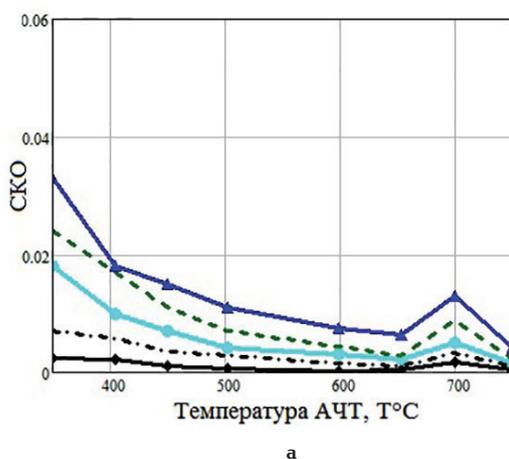


Рис. 7. Среднеквадратическое отклонение коэффициента пропускания среды пылевой камеры на первом этапе измерений (а) и на стадии активного пылевого облака второго этапа измерений (б), где 1–5 — данные всех каналов пирометрического модуля

температуре АЧТ 500 °С): для пылемера (рис 4а), а также первого (широкополосного) канала пирометрического модуля (рис. 3 и рис. 4б). Где n_d — это номер измерения показаний пылемера (цикл — 128 измерений), а n_p — это номер измерения пирометрического модуля (цикл — 50 измерений), время одного цикла измерений примерно 70 секунд. Анализ показывает, что информативными признаками состояний могут выступать: среднее значение коэффициента пропускания, дисперсия коэффициента пропускания, а также скорость изменения среднего значения коэффициента пропускания (дрейф) для стадии осаждения пыли.

На рис. 5–7 приведены обобщенные результаты статистической обработки данных, полученных для всего комплекса исследований.

Рис. 5 показывает степень корреляции между собой спектрального коэффициента пропускания для всех измерительных каналов, включая канал пылемера при изменении температуры, а следовательно, интенсивности и спектрального состава потока излучения, используемого инфракрасного излучателя (АЧТ), исследования степени ослабления инфракрасного излучения в поддиапазонах, соответствующих пяти датчикам пирометра (цифры 1–5 на рис. 5), а также, для сравнения, результат

оценки коэффициента пропускания среды пылемером (П). Данные исследования были проведены при разных температурах АЧТ. Анализ графиков позволяет сделать предварительный вывод о независимости коэффициента пропускания пылевого облака данного состава в пределах используемого диапазона длин волн, в том числе и для рабочей длины волны пылемера. Последнее подтверждает возможность использования оптического пылемера с рабочей длиной волны 640 нм для независимой оценки параметров запыленности при испытании пирометрических приборов.

По данным рис. 6 можно сделать аналогичный вывод о степени взаимной корреляции оценок коэффициента пропускания, соответствующих пяти каналам пирометрического модуля, для случая остаточной запыленности (после осаждения пыли на защитных окнах). Данные для пылемера не показаны, поскольку канал пылемера использует другие защитные окна.

Рис. 7 отражает уровень среднеквадратического отклонения коэффициента пропускания среды пылевой камеры в начальном состоянии (а) и в активной фазе пылевого облака (б). Анализ показывает, что SKO является информативным параметром, свидетельствующим об активной фазе пылевого об-

лака (рис. 7б). Графики рис. 7а также демонстрируют возрастание влияния собственных шумов используемых приемников излучения при температурах АЧТ ниже 400 °С. Для этапа осаждения пыли простое применение критерия СКО является не совсем корректным, поскольку необходимо предварительно исключить из рассмотрения медленный дрейф среднего значения коэффициента пропускания.

В заключение можно констатировать, что предложенная экспериментальная установка позволяет моделировать различные ситуации запыленного состояния пространства между прибором бесконтактного контроля температуры и объектом измерения и может быть использована для этих целей.

Библиографический список

1. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД Спектр, 2009. 544 с. ISBN 978-5-904270-05-6.
2. Minkina W., Dudzik S. Infrared Thermography. Errors and Uncertainties. NY.: John Wiley & Sons, 2009. 212 p. ISBN 978-0-470-74718-6.
3. Bouvry B., Cheymol G., Ramiandrisoa L. [et al.]. Multispectral pyrometry for surface temperature measurement of oxidized Zircaloy claddings // Infrared physics and technology. 2017. Vol. 83. P. 78–87. DOI:10.1016/j.infrared.2017.04.013.
4. Zhang Y., Lang X., Hu Z. [et al.]. Development of a CCD-based pyrometer for surface temperature measurement of casting billets // Measurement science and technology. 2017. Vol. 28, no. 6. P. 1–11. DOI:10.1088/1361-6501/aa6928.
5. Магунов А. Н. Спектральная пирометрия. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 248 с. ISBN 978-5-9221-1385-4.
6. Ионов Б. П., Ионов А. Б., Чернышева Н. С., Ольшанский А. В. Использование температурно-спектрального представления данных для спектрально-статистической многоканальной пирометрии // Приборы. 2015. № 11. С. 5–11.
7. 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.
8. Zang Z. M., Tsai B. K., Machin G. Radiometric Temperature Measurements: II. Application. Vol. 43. Experimental Methods in the Physical Sciences. Publisher: Academic Press, 2009. 480 p.

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

10. Клименко А. П. Методы и приборы для измерения концентрации пыли. М.: Химия, 1978. 208 с.

11. Якшик А., Орлова И. А. Современные анализаторы концентрации пыли серии DUSTHUNTER // Энергетик. 2010. № 9. С. 49–50.

12. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение: пер. с франц. М.: Мир, 1988. 416 с. ISBN 5-03-000915-9.

ЧЕРНЫШЕВА Надежда Сергеевна, аспирантка кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики».

SPIN-код: 7451-4970

AuthorID (РИНЦ): 909195

Адрес для переписки: wia_lady@mail.ru

ИОНОВ Антон Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики».

SPIN-код: 5647-6944

AuthorID (РИНЦ): 518556

Адрес для переписки: antionov@mail.ru

ИОНОВ Борис Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики».

SPIN-код: 8118-3805

AuthorID (РИНЦ): 685217

Адрес для переписки: bion_rtu@mail.ru

Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 05.02.2018 г.

© Н. С. Чернышева, Б. П. Ионов, А. Б. Ионов