

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ

На практике, зачастую, возникает проблема, связанная с эрозией внутренней поверхности дымовой трубы. Отслеживание процесса износа целесообразно производить при помощи периодической диагностики. В качестве одного из рациональных вариантов решения данной задачи в статье разработана методика диагностики состояния внутренней поверхности дымовой трубы в рамках методологии тепловой диагностики. Толщина материала стенки трубы определяется для измеренного значения температуры наружной поверхности трубы с учетом значений следующих параметров: наружный диаметр трубы, коэффициенты конвективной теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях трубы, приведенный коэффициент излучения от наружной поверхности в окружающую среду, температура продуктов сгорания на исследуемом горизонте трубы, температура окружающей среды и коэффициент теплопроводности материала стенки трубы. В результате оценки параметрической чувствительности методики установлено, что наибольшее влияние на результат оказывают погрешности задания характерных температур процесса и измерения температуры наружной поверхности трубы.

Ключевые слова: дымовая труба, неразрушающий контроль, тепловая диагностика, продукты сгорания, теплопередача, коэффициент теплоотдачи, температура поверхности, толщина стенки.

Постановка проблемы

При эксплуатации дымовых труб зачастую возникает эрозия внутренней поверхности, связанная с агрессивным воздействием дымовых газов (прежде всего сернокислотная коррозия). Поскольку одним из актуальных направлений развития современного предприятия является комплексная диагностика состояния всех элементов оборудования, целесообразным является решение вопроса о создании метода неразрушающего контроля, позволяющего периодически проводить контроль состояния внутренней поверхности стенок дымовой трубы. Очевидно, что при технической возможности внутренней телеметрии такой подход в большинстве случаев не является рациональным. Наиболее перспективным в данном случае является метод тепловой диагностики.

Анализ последних исследований и публикаций

Разработке методов тепловой диагностики посвящено достаточно большое количество исследований отечественных и иностранных авторов [1...10]. При этом в значительной мере внимание сосредоточено на технической стороне решения этих вопросов: выбор пирометров и тепловизоров и способы идентификации «про-

blemных участков» на основании идентификации отклонений температурного состояния исследуемых поверхностей материалов и оборудования от номинального уровня.

Так, например, на рис. 1 представлена термограмма и фотография верхней части дымовой трубы котельной с дефектом оголовка. Тепловизионное обследование позволяет определить местные температурные аномалии на поверхности ствола трубы с помощью инфракрасной техники, при которой проявляются некачественные швы бетонирования, трещины несущего ствола, понижение сопротивления газопроницаемости материала, зоны разрушения ствола или футеровки, нарушение или отсутствие теплоизоляции и т.п. С точки зрения применения тепловизионного метода, дефекты ограждающих конструкций дымовой трубы, работающей в переменном температурном режиме и часто в агрессивной среде, можно условно разделить на 2 группы:

- дефекты, связанные с нарушением целостности ограждающих конструкций (трещины, разрушения несущего слоя бетона, нарушение футеровки, коррозия и т.д. и т.п.);
- дефекты, связанные с изменением теплопроводности и сопротивления газопроницаемости материалов (пористости бетона, образование пустот, изменение влажности и т.д.).

Безусловно такой метод диагностики более наглядный, однако он не лишен недостатков: полученное изображение является качественным и зачастую не позволяет произвести количественные оценки.

В целом интерпретация результатов основывается на общих закономерностях теплопередачи, но имеет существенные особенности в связи с различной спецификой диагностируемых процессов.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является создание методики диагностики состояния внутренней поверхности дымовой трубы в рамках общей методологии тепловой диагностики.

Основной материал

При эксплуатации дымовых труб зачастую возникает эрозия внутренней поверхности, связанная с агрессивным воздействием дымовых газов (прежде всего серноокислотная коррозия). В то же время при движении продуктов сгорания вверх по трубе имеют место потери теплоты, связанные с теплопередачей от продуктов сгорания в окружающую среду. Дальнейшие выкладки основаны на предположении об идеальной газоплотности стенки трубы и относятся к случаю однослойной стенки. Полное термическое сопротивление на пути распространения теплоты складывается из трех составляющих: сопротивления теплоотдаче от продуктов сгорания (конвекцией и излучением) к внутренней поверхности дымовой трубы $R_в$, сопротивления передаче теплоты теплопроводностью через стенку трубы R_m и сопротивления передаче теплоты (конвекцией и излучением) от наружной поверхности стенки трубы в окружающую среду R_n .

Линейная плотность теплового потока, передаваемая на определенном горизонте трубы в окружающую среду, вычисляется как [11]:

$$q = \frac{t_{nc} - t_{oc}}{R_в + R_m + R_n} \tag{1}$$

где t_{nc} – температура продуктов сгорания на рассматриваемом горизонте трубы, °C; t_{oc} – температура окружающей среды, °C.

Элементарные термические сопротивления с учетом передачи теплоты через цилиндрическую стенку определяются следующим образом:

$$R_m = \frac{1}{2\pi\lambda} \cdot \ln\left(\frac{d_n}{d_в}\right), \tag{2}$$

$$R_в = \frac{1}{\pi d_в \alpha_в}, \tag{3}$$

$$R_n = \frac{1}{\pi d_n \alpha_n}, \tag{4}$$

где d_n – наружный диаметр трубы на рассматриваемом горизонте, м; $d_в$ – определяемое в результате расчета значение внутреннего диаметра трубы; $\alpha_в$ – итоговое значение коэффициента теплоотдачи от продуктов сгорания к внутренней поверхности трубы, Вт/(м²·К); α_n – итоговое значение коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности трубы в окружающую среду, Вт/(м²·К).

Значение α_n определяется как:

$$\alpha_n = \alpha_{н.луч} + \alpha_{н.конв}, \tag{5}$$

где $\alpha_{н.луч}$, $\alpha_{н.конв}$ – лучистая и конвективная составляющие итогового коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности трубы в окружающую среду, Вт/(м²·К).

Значение $\alpha_{н.луч}$ находим при помощи выражения:

$$\alpha_{н.луч} = \left(c_{np} \cdot \left[\left(\frac{t_n + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{oc} + 273}{100} \right)^4 \right] \right) \times (t_n - t_{oc})^{-1} \tag{6}$$



Рис. 1 Термограмма и фотография верхней части дымовой трубы котельной с дефектом оголовка

где t_n – измеренное значение температуры поверхности трубы, °C; C_{np} – приведенное значение коэффициента излучения от наружной поверхности трубы в окружающую среду, Вт/(м²·К⁴).

Величины $\alpha_{н,конв}$, $\alpha_в$, C_{np} определяются при помощи классических зависимостей, представленных, например в [11].

Поскольку термическое сопротивление стенки трубы зависит от ее толщины и теплопроводности материала (материалов), из которого она состоит, идентификация количественного значения этого термического сопротивления позволяет перейти к толщине стенки трубы.

Так как в стационарном режиме через каждое из термических сопротивлений проходит одна и та же линейная плотность теплового потока, можно записать следующее соотношение:

$$q = \frac{t_{nc} - t_{oc}}{R_в + R_m + R_n} = \frac{t_{nc} - t_n}{R_в + R_m}, \quad (7)$$

разрешая которое относительно R_m , получаем:

$$R_m = -R_в + R_n \cdot \frac{t_{nc} - t_n}{t_n - t_{oc}}. \quad (8)$$

В конечном итоге с учетом выражений (2...8) получаем следующее трансцендентное уравнение, из которого можно определить искомое значение $d_в$:

$$\frac{1}{2\pi\lambda} \cdot \ln\left(\frac{d_n}{d_в}\right) = -\frac{1}{\pi d_в \alpha_в} + \left(\pi d_n \frac{C_{np} \cdot \left[\left(\frac{t_n}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_{oc}}{100}\right)^4 \right]}{t_n - t_{oc}} + \alpha_{н,конв} \right)^{-1} \times \frac{t_{nc} - t_n}{t_n - t_{oc}} \quad (9)$$

Остаточное значение толщины стенки трубы по рассмотренному радиальному направлению определяется как:

$$\delta = \frac{d_n - d_в}{2} \quad (10)$$

Таким образом, составлен научный инструментарий, который позволяет на основании результата измерения температуры наружной по-

верхности стенки трубы определить остаточную толщину стенки трубы.

Параметрами, необходимыми для решения этой задачи являются: d_n , $\alpha_в$, α_n , C_{np} , t_{nc} , t_{oc} , λ .

Для использования разработанной методики оценки погрешности полученного результата необходимо провести исследование параметрической чувствительности модели к погрешностям определения обозначенных выше параметров задачи и температуры наружной поверхности дымовой трубы.

В качестве базовой точки выбран результат, соответствующий следующему набору значений параметров задачи: $d_n=2,5$ м; $\alpha_в=10$ Вт/(м²·К); $\alpha_n=10$ Вт/(м²·К); $C_{np}=4$ Вт/(м²·К⁴); $t_{nc}=130$ °C; $t_{oc}=0$ °C; $\lambda=1,1$ Вт/(м·К) при результате замера температуры наружной поверхности трубы $t_n=22,2$ °C.

В результате идентификации значения толщины стенки трубы получено значение 0,231 м.

Ниже проведено исследование влияния отклонений таких параметров как $\alpha_в$, α_n , C_{np} и λ на следующие величины в %:

-10	-7,5	-5	-2,5	2,5	5	7,5	10
-----	------	----	------	-----	---	-----	----

а также характерных температуры t_{nc} , t_{oc} и измеренного значения температуры наружного воздуха t_n на следующие значения в °C:

-5	-4	-3	-2	-1	1	2	3	4	5
----	----	----	----	----	---	---	---	---	---

Результаты численных экспериментов систематизированы в табл. 1...2.

Оценка параметрической чувствительности предлагаемой методики выявила, что для коэффициента конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности трубы и приведенного коэффициента излучения погрешность задания в 1 % приводит к погрешности идентифицированного значения толщины стенки менее, чем на 0,5 %. При этом для коэффициента конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности знаки погрешности параметра и результата диагностики совпадают, а для приведенного коэффициента излучения они противоположны. Для коэффициента конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности трубы и коэффициента теплопроводности погрешность задания в 1 % приводит к погрешности идентифицированного значения толщины стенки менее, чем на 1 %. Для коэффициента теплопроводности материала стенки знаки погрешности параметра и результата диагностики совпадают, а для коэффициента конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности трубы они противоположны.

Табл. 1 Результаты изучения влияния погрешности задания параметров модели на устанавливаемое значение остаточной толщины стенки

Параметры		Математическое выражение результата	Уровень погрешности параметра относительно базового значения								
			-10	-7,5	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	10
Относительная погрешность определения искомой величины	α_n	$\frac{\delta(\alpha_n) - \delta_\sigma}{\delta_\sigma} \cdot 100, \%$	9,96	7,36	4,76	2,6	0	-2,17	-4,33	-6,49	-8,66
	α_e	$\frac{\delta(\alpha_e) - \delta_\sigma}{\delta_\sigma} \cdot 100, \%$	-4,76	3,46	-2,17	-1,08	0	1,08	2,17	3,03	3,90
	C_{np}	$\frac{\delta(C_{np}) - \delta_\sigma}{\delta_\sigma} \cdot 100, \%$	3,46	2,6	1,73	0,87	0	-0,87	-1,73	-2,38	-3,03
	λ	$\frac{\delta(\lambda) - \delta_\sigma}{\delta_\sigma} \cdot 100, \%$	-8,23	-6,06	-3,9	-2,17	0	2,17	3,9	6,06	8,23

Табл. 2 Результаты изучения влияния погрешности задания характерных температур на устанавливаемое значение остаточной толщины стенки

Параметры		Математическое выражение результата	Абсолютная погрешность задаваемого значения характерной температуры										
			-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
Относительная погрешность определения искомой величины	t_n	$\delta = \frac{\delta(t_n) - \delta_\sigma}{\delta_\sigma} \cdot 100, \%$	42,42	32,46	23,38	15,5	7,36	0	-6,49	-12,99	-18,62	-24,24	-29,0

Для температуры продуктов сгорания погрешность в 1 °С приводит к погрешности результата порядка 1 %, знаки погрешности параметра и результата совпадают. Для температуры окружающей среды погрешность в 1 °С приводит к погрешности результата около 5 %, при этом знаки погрешности параметра и результата также совпадают. Что касается результата измерения температуры наружной поверхности трубы, то погрешность в 1 °С приводит к погрешности результата около 7 %, а знаки погрешности данных измерения и результата диагностики – противоположны.

Вывод

Разработана методика, позволяющая на основании измеренного значения температуры наружной поверхности дымовой трубы диагностировать толщину стенки трубы (по направлению замера), через которую теплота передается теплопроводностью. Параметрами, необходимыми для решения этой задачи являются:

наружный диаметр трубы, коэффициенты конвективной теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях трубы, приведенный коэффициент излучения от наружной поверхности в окружающую среду, температура продуктов сгорания на исследуемом горизонте трубы, температуры окружающей среды и коэффициент теплопроводности материала стенки трубы.

Оценка параметрической чувствительности показала особенное влияние точности определения температуры окружающей среды и точности измерения температуры наружной поверхности трубы на результаты диагностики. При дальнейшем развитии разработанной методики необходимо учитывать возможность неравномерного распределения значения коэффициента конвективной теплоотдачи по наружному периметру поверхности трубы на исследуемом горизонте, формируемого при обтекании трубы ветром.

Также в дальнейшем целесообразно прорабатывать возможность аппроксимации в полярной системе координат результатов диагностики для

ряда точек, равномерно расположенных по периметру исследуемого горизонта трубы, для последующего упрощения расчетов прочностных характеристик трубы.

Список литературы

1. Героев, А. Е. Тепловизионный контроль дымовых труб / А.Е. Героев // Вестник евразийской науки. – 2013. – № 3 (16). – С. 133.
2. Бабушкин, Р. А. Тепловизионная диагностика дымовых труб / Р.А. Бабушкин, Д.С. Гмызов Д.С., Ю.П. Иванов // Инновационная наука. – 2015. – № 9. – С. 52-57.
3. Усов, Н. А. Тепловизионное обследование дымовых труб / Н.А. Усов, Р.И. Бикбулатов, А.Р. Галимова // Научные исследования. – 2017. – № 2 (13). – С. 29-31.
4. Хан, В. В. Термография в энергоаудите / В.В. Хан, В.П. Попов, М.В. Половнёв // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 10 (81). – С. 261-267.
5. Власов, А. Б. Особенности реализации метода количественной термографической диагностики при внедрении цифровых технологий / А.Б. Власов, К.Б. Аллюяров // Вестник МГТУ. – 2019. – Т. 22. – № 4. – С. 484–495.
6. Dukovska L, Petkov V., Mihailov Em., Vasileva S. Image Processing for Technological Diagnosis of Metallurgical Facilities. Cybernetics and Information Technologies, Vol. 12, No 4, 2012, pp. 66–76.
7. Chou Y. and Yao L. Automatic Diagnostic System of Electrical Equipment Using Infrared Thermography, 2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition, Malacca, 2009, pp. 155–160.
8. Методика обследования дымовых труб тепловых электростанций визуальным способом и при помощи тепловизора (Отчет по договору 96-137-901-025, 1-й кв. 1996 г.). М.: ОРГРЭС, ПЛИТ, 1996.
9. Борисенко, В. Ф. Диагностирование теплового состояния электромеханического оборудования / В.Ф. Борисенко, А.И. Землянский, В.А. Сидоров, Е.В. Сидорова // Горные науки и технологии. –2019. – 4(3). – С. 188-201.
10. Нуржанов, Д. Х., (2018) Бесконтактная диагностика оборудования с применением тепловизоров / Д.Х. Нуржанов, А.С. Васильев, А.Ю. Подсякина, О.В. Москвитина, Н.С. Редута // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». – 2018. – № 2. – С. 368-370.

Heat and mass transfer: Workbook for students of institutes and universities / S.I. Ginkul, V.V. Kravtsov, V.I. Sheludchenko, A.B. Birukov.– Donetsk: Nord-Press, 2006. – 291 p.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/, P.A. Gnitiev /Cand. Sci. (Eng.)/

Donetsk National Technical University (Donetsk) Donetsk National Technical University (Donetsk)

METHOD FOR DIAGNOSING THE STATE OF THE INTERNAL SURFACE CHIMNEY

Background. Currently, industrial enterprises operate equipment that was put into operation decades ago. Over time, any node wears out, becomes obsolete, deformed and undergoes other changes that affect its performance properties. In the case of operation of chimneys, diagnosing its internal state is a difficult task. The purpose of this work is to create a method for diagnosing the state of the inner surface of the chimney within the framework of the general methodology of thermal diagnostics.

Materials and/or methods. As one of the rational options for solving this problem, the article developed a method for diagnosing the state of the inner surface of the chimney within the framework of the methodology of thermal diagnostics. The thickness of the pipe wall material is determined for the measured value of the temperature of the outer surface of the pipe, taking into account the values of the following parameters: the outer diameter of the pipe, the coefficients of convective heat transfer on the inner and outer surfaces of the pipe, the reduced coefficient of radiation from the outer surface to the environment, the temperature of the combustion products at the investigated horizon of the pipe, ambient temperature and thermal conductivity of the pipe wall material.

Results. A technique has been developed that makes it possible, on the basis of the measured value of the temperature of the outer surface of the chimney, to diagnose the thickness of the material (in the direction of measurement), through which heat is transferred by thermal conductivity. As a result of the evaluation of the parametric sensitivity of the technique, it was found that the errors in setting the characteristic temperatures of the process and measuring the temperature of the outer surface of the pipe have the greatest influence on the result.

Conclusion. Using the proposed calculation method, it is possible to determine the state of the inner surface of the chimney. This technique is useful for routine maintenance of the chimney, as well as for finding problem areas and preventing pipe destruction.

Keywords: chimney, non-destructive testing, thermal diagnostics, combustion products, heat transfer, heat transfer coefficient, surface temperature, wall thickness.

Сведения об авторах

А.Б. Бирюков

SPIN-код: 3186-0680
Author ID: 7006918782
ORCID iD: 0000-0002-8146-2017
Телефон: +380 (62) 301-08-61
Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

П.А. Гнитиёв

SPIN-код: 1943-4196
Author ID: 56916104300
ORCID iD: 0000-0001-9266-7969
Телефон: +380 (71) 321-50-15
Эл. почта: spyh@ya.ru

Статья поступила 07.12.2021 г.
© А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиёв, 2021
Рецензент д.т.н., проф. Н.А. Ченцов

