

УДК 674.053:621.93

КОМПЕНСАЦИЯ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ИК-КОНТРОЛЕ НАГРЕВА КРУГЛЫХ ПИЛ

© *М.А. Хвиузов, ст. преп.*

А.Н. Галашев, доц.

И.И. Соловьев, доц.

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: mik5512@yandex.ru; galashev@list

В качестве параметра контроля и прогнозирования работоспособности круглопильного оборудования предлагается использовать температуру нагрева дереворежущих круглых пил. В реальных условиях процесса лесопиления температуру режущего инструмента указанного типа станков можно измерять методом инфракрасного теплового контроля. Основной проблемой этого метода является высокая вероятность появления методической погрешности измерения, величина которой при определенных условиях делает его непригодным. Поэтому целью проведенного исследования являлось установление способа компенсации методической погрешности, снижающего разницу между инструментальной и фактической температурами до минимальных значений. Методическая погрешность при дистанционном измерении температуры радиационными пирометрами определяется точностью учета коэффициента теплового излучения объекта. Значение коэффициента теплового излучения зависит от многочисленных факторов, основные из которых – материал и температура объекта, а также температура окружающего пространства. При выполнении теоретических изысканий было установлено, что в справочных и методических источниках отсутствуют достоверные сведения о величине и характере изменения коэффициента излучения инструментальных низколегированных сталей, применяемых для корпусов пил. Поэтому было принято решение о проведении эксперимента с использованием метода тепловой стимуляции. В результате эксперимента было установлено, что коэффициент теплового излучения корпусов круглых пил снижается при увеличении температуры нагрева от +30 до +100 °С и повышается при увеличении температуры рабочего пространства пил от +10 до +20 °С. Коэффициент теплового излучения для указанных температурных диапазонов при измерении пирометрами частичного излучения в спектре 8...14 мкм изменяется от 0,20 до 0,34. В ходе регрессионного анализа результатов эксперимента были установлены аналитические зависимости коэффициента теплового излучения от температуры нагрева и воздушной среды в зоне инфракрасного контроля для круглых пил, изготовленных из инструментальных сталей марок 9ХФ и 80CrV2. Применение регрессионных уравнений позволяет компенсировать методическую погрешность при радиационном температурном контроле на уровне, не превышающем 5 %. Они могут быть использованы при настройке пирометров частичного излучения для производства измерений.

Ключевые слова: температурный перепад, инфракрасный пирометр, коэффициент теплового излучения, нагрев, дисковая пила.

Величина и характер нагрева пильного диска при пилении древесины оказывают существенное влияние на его работоспособность и эффективность всего процесса пиления. Основной температурной характеристикой является температурный перепад между периферийной и центральной зонами пилы ΔT , при условии достижения и превышения допустимого значения которого происходит потеря динамической устойчивости и нарушение плоской формы пилы [6].

Метод дистанционного термометрического контроля позволяет использовать в качестве контролируемого параметра процесса пиления температуру нагрева пильного диска [10]. Большая часть средств измерений данного метода (около 70 %) основана на определении фактической температуры по тепловому излучению удаленных и движущихся тел. Эти средства объединены под общим названием – радиационные (инфракрасные) пирометры [4].

Принцип работы инфракрасного пирометра заключается в концентрации и трансформации теплового излучения в инфракрасном детекторе (сенсоре) в электрическое напряжение, которое затем через усилитель передается в микропроцессор. Связь между радиационной температурой T_p и действительной температурой объекта измерения T установлена закономерностью Стефана–Больцмана [3, 11]:

$$T = T_p \sqrt[4]{1/\varepsilon_T}, \quad (1)$$

где ε_T – полный коэффициент теплового излучения (интегральная степень черноты).

Далее следует расчет по программе математической обработки сигнала, заложенной производителем пирометра с использованием фиксированных или переменных значений коэффициента теплового излучения (КТИ) и тепловой «засветки» окружающей среды. После этого выдается результат измерения.

Не смотря на очевидные достоинства (высокое быстродействие, простота обращения и др.) использование пирометров в реальных условиях часто сопровождается значительными отклонениями показываемых температурных значений от действительных [12, 13]. Когда инструментальная погрешность, гарантированная производителем, находится в пределах $\pm 1,5\%$, отклонения при определенных условиях термоконтроля могут достигать 50 %, что делает применение пирометра бессмысленным [8, 9].

Исследователями и практиками установлено, что причиной таких отклонений является методическая погрешность, вызываемая несоответствием установленного в пирометре значения КТИ фактическому. Для установления максимально точного значения и, соответственно, компенсации методической погрешности необходимо выполнять предварительное тестирование пирометра по излучающим свойствам контролируемого объекта [1, 5].

Проблема заключается в том, что теоретически точное определение ε_T затруднительно из-за того, что излучающие свойства зависят от материала

объекта, состояния его поверхности, температуры окружающей среды, спектрального диапазона инфракрасного излучения, наличия флуктуации самого КТИ. Аналитические зависимости взаимодействий перечисленных факторов отсутствуют.

Значение КТИ при использовании пирометра частичного излучения, откалиброванного по «модели черного тела» (МПЧ), можно определить из следующего соотношения [1]:

$$T_{\Pi} = \left[\varepsilon T^n + (1 - \varepsilon) T_A^n \right]^{1/n}, \quad (2)$$

где T_{Π} – температура, показываемая пирометром, К;

ε – коэффициент теплового излучения;

T – фактическая температура поверхности, К;

n – показатель степени в функции Планка, зависящий от спектрального диапазона пирометра (при 7...14 мкм имеем $n = 4,83$);

T_A – температура окружающего воздуха в зоне измерения, К.

Для МПЧ показатель $\varepsilon = 1$, а для «серых» и «не серых» тел всегда меньше 1 [11], следовательно, можно предположить, что действительное значение КТИ корпуса круглой пилы

$$\varepsilon_{\text{д}} = 1 - \Delta\varepsilon, \quad (3)$$

где $\Delta\varepsilon$ – разница значений КТИ измеряемого объекта и МПЧ.

Подставим (3) в (2):

$$T_{\Pi} = \left[(1 - \Delta\varepsilon) T^n + (1 - (1 - \Delta\varepsilon)) T_A^n \right]^{1/n}; \quad (4)$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{T_{\Pi}^n - T^n}{T_A^n - T^n}. \quad (5)$$

Если конструкция пирометра позволяет изменять КТИ, то уменьшением ε на $\Delta\varepsilon$ устанавливается значение, равное $\varepsilon_{\text{д}}$.

В том случае, когда измерения выполняются пирометром с фиксированным значением КТИ, отличающимся от 1, то преобразование формулы (2) может быть выражено в виде

$$\Delta\varepsilon = \frac{T_{\Pi}^n - \varepsilon_{\Pi} (T^n - T_A^n) - T_A^n}{T_A^n - T^n}, \quad (6)$$

где ε_{Π} – фиксированное значение КТИ пирометра.

Для определения действительного КТИ материалов корпусов круглых пил и компенсации методической погрешности инфракрасного контроля нагрева был выбран экспериментальный метод активного температурного контроля [14], который осуществлялся следующим образом.

Круглую пилу устанавливали на вал приспособления «ПН» (ТУ 13-345–77, разработки ЦНИИМОД) [7], фиксировали зажимными фланцами. Затем производили нагрев одной стороны корпуса пилы воздушным потоком промышленного фена «Skil» марки Heat gun 8005. С другой стороны корпуса снимали температурные показания пирометром (T_{Π}) и термопарой цифрового мультиметра MAS 838, показания которого принимали за фактическую температуру (T). Температуру воздуха (T_A) между пирометром и корпусом измеряли цифровым термометром ДТ-610В. Для предотвращения возможных тепловых фоновых «шумов» пространство между плоскостями пилы и пирометра было экранировано.

Промышленный фен был принят в качестве источника тепловой стимуляции по следующим причинам. Во-первых, его конструкция позволяет регулировать тепловой поток через конусную насадку от 50 до 650 °С с шагом 10 °С. Во-вторых, паразитные шумы, возникающие при его работе, ниже, чем при индукционном или другом способе нагрева [1].

Температуру T_{Π} дистанционно измеряли инфракрасными пирометрами марок «Condrol 2 IT» (С) с фиксированным ε_{Π} , равным 0,95, и «ARKOM PR 480» (А) с ε_{Π} , изменяемым от 0,1 до 1,0. Данные приборы относятся к пирометрам частичного излучения, работают в длинноволновом диапазоне инфракрасного излучения (8...14 мкм), имеют лазерный целеуказатель и показатель визирования 10:1, предназначены для работы в низкотемпературном диапазоне до 480...500 °С.

Необходимо отметить, что пирометры данного типа уступают по точности измерения пирометрам спектрального отношения. Последние обладают двумя приемниками и, как следствие, являются сложнее, крупнее и намного дороже [9]. Оправдывают свое применение в диапазоне высоких температур от 400 до 1500 °С.

Порядок выполнения опытов. Сначала измерения проводили пирометром (А), настроенным на КТИ, равным 1. Далее следовал расчет по формулам (5) и (3). Одновременно использовали пирометр (С) с последующим расчетом $\Delta\varepsilon$ по формуле (6). Затем, при тех же условиях опыта, устанавливали расчетное значение ε в пирометре (А) и измеряли температура корпуса пилы для установления соответствия расчетных значений действительным.

В качестве объектов измерения применяли следующие пилы для продольной распиловки древесины: отечественная производства ГМЗ 3420-0366 (ГОСТ 9769–79) и импортная фирмы «Paritet» (400×36×50). Показания фиксировали при нагреве и охлаждении пил с учетом предварительно определенного числа дублированных опытов, равного 16. Диапазоны, интервалы варьирования входных параметров и результаты тестирования, полученные после статистической обработки, представлены в таблице.

Значения коэффициентов теплового излучения корпусов круглых пил

Фактическая температура T , °C	Показания пирометра			Коэффициент теплового излучения		
	$T_{\text{П}}$, °C, при $T_{\text{А}}$, °C			ε при $T_{\text{А}}$, °C		
	10	15	20	10	15	20
<i>ГМЗ 3420-0366</i>						
30	18,0	21,1	24,1	0,319	0,327	0,335
35	19,8	23,1	26,0	0,304	0,319	0,327
40	21,9	24,8	28,0	0,301	0,304	0,320
45	23,8	26,7	30,1	0,292	0,297	0,313
50	25,2	28,6	31,9	0,272	0,288	0,306
55	26,6	30,5	34,0	0,255	0,280	0,299
60	28,6	32,4	36,0	0,251	0,273	0,292
65	30,6	34,3	39,1	0,248	0,266	0,286
70	32,5	36,2	40,0	0,242	0,259	0,279
75	33,8	38,1	42,0	0,228	0,253	0,273
80	35,6	40,0	44,0	0,222	0,246	0,267
85	37,6	41,9	46,0	0,219	0,240	0,261
90	39,2	43,8	48,2	0,211	0,234	0,255
95	41,2	45,7	50,0	0,207	0,229	0,250
100	43,2	47,6	52,0	0,204	0,223	0,244
<i>«Paritet»</i>						
30	17,7	20,8	23,8	0,304	0,314	0,315
35	19,6	22,7	25,7	0,296	0,305	0,308
40	21,5	24,3	27,7	0,288	0,285	0,305
45	23,4	26,3	29,6	0,281	0,283	0,297
50	24,6	28,3	31,6	0,258	0,279	0,293
55	26,2	30,1	33,7	0,247	0,270	0,291
60	28,1	32,0	35,6	0,242	0,264	0,283
65	30,0	33,9	37,8	0,238	0,258	0,282
70	32,1	35,8	39,6	0,236	0,252	0,272
75	33,3	37,6	41,7	0,221	0,245	0,268
80	35,0	39,8	43,5	0,215	0,243	0,259
85	37,3	41,5	45,7	0,215	0,235	0,257
90	38,8	43,2	47,6	0,206	0,227	0,250
95	40,8	45,1	49,4	0,203	0,222	0,243
100	43,0	47,2	51,4	0,202	0,219	0,238

Анализ данных таблицы показывает следующее:

1. Результаты тестирования пил обеих марок отличаются незначительно, в пределах 2 %, что, очевидно, обусловлено тем, что внешний вид корпусов и химический состав инструментальных низколегированных сталей (отечественной 9ХФ и немецкой 80CrV2) [7], подобны друг другу. КТИ отечественной пилы несколько выше и более интенсивно изменяется, но предполагать, что это вызвано отличием содержания в материале отдельных химических элементов, по мнению авторов, не стоит. Скорее всего, это результат отличия внешней поверхности.

2. Отличие пирометрической температуры от фактической монотонно возрастает при увеличении температуры нагрева T , снижении температуры фона T_A от минимального (20 % в точке (20; 30)) до максимального (57 % в точке (10; 100)).

3. Коэффициенты теплового излучения в обоих случаях зависимы от изменения T и T_A , что свидетельствует о том, что материалы корпусов пил относятся к группе «не серых», т. е. для выполнения корректного инфракрасного температурного контроля это обстоятельство следует тщательно учитывать.

В результате выполнения регрессионного анализа экспериментальных данных [2] были установлены аналитические зависимости коэффициента теплового излучения от температур нагрева и воздушной среды в зоне ИК-контроля:

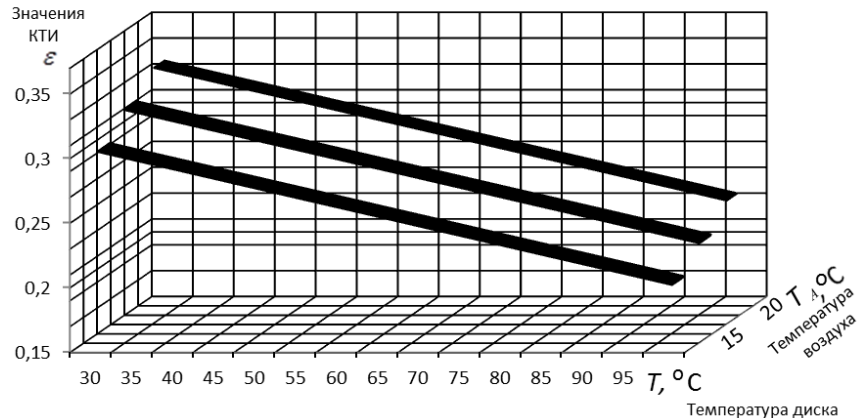
для пил ГМЗ 3420-0366

$$\varepsilon = 0,31 + 0,00356 \cdot T_A - 0,00147 \cdot T; \quad (7)$$

для пил «Paritet»

$$\varepsilon = 0,29 + 0,00339 \cdot T_A - 0,0013 \cdot T. \quad (8)$$

Графическая интерпретация уравнения (8) представлена на рисунке.



Сопоставив значения КТИ, полученных из уравнений (7) и (8), с табличными были установлены максимальные отклонения $\delta\varepsilon$, которые составили 0,017 и 0,019 для ГМЗ и «Paritet» соответственно.

Для ИК-контроля в реальных условиях воздействия окружающей среды с температурой T_A , преобразуя формулы (1) и (2), можно установить размер погрешности:

$$\delta T = \frac{T}{n} \left[1 - \left(\frac{T_A}{T} \right)^n \right] \left| \frac{\delta\varepsilon}{\varepsilon} \right|. \quad (9)$$

Максимальные отклонения температуры, судя по таблице и формуле (9), будут наблюдаться в точке (10; 100). Рассчитанные значения δT равны 4,3 и 4,7 °С, что не превышает 5 % от максимального значения температуры нагрева.

Основным результатом проделанной работы можно считать установление значений и характера изменения КТИ корпусов круглых пил в длинноволновом спектральном диапазоне. Разработанные математические модели расчета КТИ позволят значительно снизить размер методической погрешности при выполнении температурного ИК-контроля в условиях реального пиления на круглопильных станках для распиловки древесины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Вавилов В.П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД «Спектр», 2009. 544 с.
2. *Воскобойников Ю.Е.* Регрессионный анализ данных в пакете Mathcad: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2011. 224 с.
3. *Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С.* Теплотехнические измерения и приборы: учеб. для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 460 с.
4. *Неделько Н.А.* Основные преимущества и недостатки пирометрического метода измерения температуры перед контактным // Оборудование. 2006. №2. С. 21–23.
5. *Нестерук Д.А., Вавилов В.П.* Тепловой контроль и диагностика: учеб. пособие для подготовки специалистов I, II, III уровней. Томск: ТПУ, 2007. 104 с.
6. *Санев В.И.* Обработка древесины круглыми пилами. М.: Лесн. пром-сть, 1980. 232 с.
7. *Стахивев Ю.М.* Работоспособность круглых пил. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 384 с.
8. *Фрунзе А.В.* Влияние методических погрешностей пирометра на выбор прибора // Фотоника. 2012. № 3. С. 46–51; С. 56–60.
9. *Фрунзе А.В.* Об одной малоизвестной особенности пирометров спектрального отношения // Фотоника. 2013. № 3. С. 86–96.
10. *Хвиюзов М.А., Галашев А.Н.* Расчет температуры нагрева поверхности пильного диска при осуществлении пирометрического контроля // Лесн. журн. 2013. № 1. С. 60–65. (Изв. высш. учеб. заведений).
11. *Цветков Ф.Ф.* Тепломассообмен: учеб. пособие для вузов. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 550 с.
12. *Booth N., Smith A.S.* Infrared Detectors. New York & Boston. Goodwin House Publishers. 1997. P. 241–248.
13. *Chrzanowski K., Szulim M.* Error of temperature measurement with multiband infrared systems // Applied Optics. 1999. Vol. 38, N 10. 1998 p.
14. *Maldaque X.* Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing. USA: John Wiley & Sons., 2001. 684 p.

Поступила 26.01.15

UDC 674.053:621.93

Compensation of Method Error in the Infrared Heating Control of Circular Saws

M.A. Khviyuzov, Senior Lecturer

A.N. Galashev, Associate Professor

I.I. Soloviev, Associate Professor

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation;
e-mail: mik5512@yandex.ru; galashev@list

We suggested using the heating temperature of wood-cutting circular saws as the control and forecasting parameter of operability of a circular-saw bench. The temperature measuring of a cutting instrument of the indicated type in the lumber sawing process was possible by the method of infrared thermal control. The basic problem of infrared control was a high probability of occurrence of the method error of measurement, the dimensions of which, under certain conditions, made this method unsuitable. In this context the goal of research was to establish the mode of the method error compensation, reducing the difference between the tool and actual temperatures to a minimum. The value of the method error in remote temperature measurement by total radiation pyrometers was determined by the accuracy of taking account of coefficient of thermal emissivity of an object. The coefficient of thermal emissivity depended on numerous factors: the material and temperature of an object and external temperature. As a result of the theoretical research it was found, that there was no reliable information in the reference and methodological sources on the magnitude and nature of changes of radiation coefficient of instrument low-alloy steel applied for a saw blade housing. Therefore, it was decided to conduct an experiment using the method of thermal stimulation. As a result of the experiment it was found, that the coefficient of thermal emissivity of a saw blade housing was reduced with increasing heating temperature ranging +30...+100 °C and increased with increasing temperature of the saws work space ranging +10...+20 °C. The coefficient of thermal emissivity for the mentioned temperature ranged when measured by the pyrometers of partial radiation in the spectrum of 8 ... 14 μm varied 0.2...0.34. As a result of regression analysis of the experiment we have established the analytic dependences of values of thermal emissivity coefficient on the heating temperature and external temperature in the area of infrared control for circular saws, made from instrument steel of 9XΦ and 80CrV2 brands. Application of regression equations enables to compensate the method error in the radiation temperature control at a level not to exceed 5 %, and they can be used at setting of pyrometers of partial radiation for measuring.

Keywords: temperature difference, infrared pyrometer, coefficient of thermal emissivity, heating, circular saw.

REFERENCES

1. Vavilov V.P. *Infrakrasnaya termografiya i teplovoy kontrol'* [Infrared Thermography and Thermal Control]. Moscow, 2009. 544 p.
2. Voskoboynikov Yu.E. *Regressionnyy analiz dannykh v pakete Mathcad* [Data Regression Analysis in the Mathcad]. Saint Petersburg, 2011. 224 p.

3. Ivanova G.M., Kuznetsov N.D., Chistyakov V.S. *Teplotekhnicheskie izmereniya i pribory* [Thermal Measurement and Devices]. Moscow, 2005. 460 p.
4. Nedel'ko N.A. Osnovnye preimushchestva i nedostatki pirometricheskogo metoda izmereniya temperatury pered kontaktnym [The Main Advantages and Disadvantages of Pyrometric Temperature Measurement Method From the Contact Method]. *Oborudovanie*, 2006, no. 2, pp. 21–23.
5. Nesteruk D.A., Vavilov V.P. *Teplovoy kontrol' i diagnostika. Uchebnoe posobie dlya podgotovki spetsialistov I, II, III urovney* [Heat Control and Diagnostics. Training Manual for the I, II, III Levels Specialists]. Tomsk, 2007. 104 p.
6. Sanev V.I. *Obrabotka drevesiny kruglymi pilami* [Circular Saws Woodworking]. Moscow, 1980. 232 p.
7. Stakhiev Yu.M. *Rabotosposobnost' kruglykh pil* [Circular Saw's Aggressiveness]. Moscow, 1989. 384 p.
8. Frunze A.V. Vliyanie metodicheskikh pogreshnostey pirometra na vybor pribora [Influence of Pyrometer Method Errors on the Device Selection]. *Photonika*, 2012, no. 3, pp. 46–51, 56–60.
9. Frunze A.V. Ob odnoy maloizvestnoy osobennosti pirometrov spektral'nogo otnosheniya [On One Little-Known Feature of Spectral Ratio Pyrometers]. *Photonika*, 2013, no. 3, pp. 86–96.
10. Khviyuzov M.A., Galashev A.N. Raschet temperatury nagreva poverkhnosti pil'nogo diska pri osushchestvlenii pirometricheskogo kontrolya [Temperature Calculation of the Blade Heating Surface in the Implementation of the Control Pyrometer]. *Lesnoy zhurnal*, 2013, no. 1, pp. 60–65.
11. Tsvetkov F.F. *Teplomassoobmen* [Heat and Mass Transfer]. Moscow, 2005. 550 p.
12. Booth N., Smith A.S. *Infrared Detectors*. New York & Boston, 1997, pp. 241–248.
13. Chrzanowski K., Szulim M. Error of Temperature Measurement with Multiband Infrared Systems. *Applied Optics*, 1999, vol. 38, no. 10. 1998 p.
14. Maldague X. *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. New York, 2001. 684 p.

Received on January 26, 2015

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.6.107
