

В.П. Сиваков, А.В. Вураско, К.С. Исаева

**ТЕМПЕРАТУРНОЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ПОДШИПНИКОВ
СУШИЛЬНЫХ ЦИЛИНДРОВ
КАРТОНОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ**

Введение. В практике технологического и технического обслуживания оборудования бумаго- и картоноделательного производства широко применяются методы диагностирования. В настоящее время, наряду с вибрационным, акустическим и тензометрическим методами [Сиваков и др., 2019; Сиваков и др., 2019; Сиваков и др., 2012; Балицкий, 1984; Сиваков и др., 2021; Сиваков и др., 2015], получил развитие и температурный метод технологического [Муромцев, 1990; Сиваков и др., 2019; Сиваков и др., 2021] и технического [Сиваков и др., 2020] диагностирования оборудования. Применению температурного диагностирования способствует доступность, удовлетворительная точность, бесконтактное измерение температуры и компактность лучевых пирометров.

Температурное диагностирование оборудования, основанное на применении современных лучевых пирометров, имеет ряд достоинств. В лучевых пирометрах отсчет показаний температуры производится по отраженному лучу от контролируемого оборудования в виде цифрового значения на шкале прибора в градусах Цельсия или Фаренгейта.

Измерение температуры производится бесконтактно, в отличие от термопар и термометров, не требует затрат на подготовку места для установки и крепления датчиков на объекте измерения. Указанные достоинства температурного диагностирования с применением лучевых пирометров значительно повышают производительность, снижают трудоемкость и, следовательно, актуальны для применения при контроле технического состояния оборудования ЦБП.

Применение лучевых пирометров для температурного диагностирования оборудования ЦБП затруднено отсутствием методов подготовки к измерениям, измерения и обработки данных температурного диагностирования.

Цель данного исследования – в разработке метода расчета допустимых уровней температур $|t|$ для работоспособного технического состояния подшипников сушильных цилиндров (СЦ) и применения $|t|$ при оценке технического состояния подшипников.

Задачи исследования следующие:

- определение общей ошибки измерения температуры подшипников СЦ;
- обоснование воспроизводимости температурного диагностирования подшипников СЦ;
- обоснование метода измерения температуры подшипников СЦ и проверка массива данных о температуре подшипников СЦ на наличие ошибок измерения;
- разработка и апробация метода расчета статистически допустимых уровней температур подшипников СЦ.

Методика исследования. Экспериментальные и теоретические исследования при разработке метода температурного диагностирования технического состояния подшипников СЦ.

Объект исследования – подшипники СЦ картоноделательной машины.

Предмет исследования – температурное диагностирование технического состояния подшипников СЦ.

Результаты исследования. Изнашивание поверхностей деталей подшипников происходит от действия сил трения между трущимися поверхностями. За период времени наработки изнашивание трущихся поверхностей деталей сопровождается образованием и развитием дефектов (изменением размеров, увеличением зазоров, образованием раковин и др.). Дефекты, как правило, увеличивают силы трения между трущимися деталями подшипников и температуру подшипников. Температуру корпусов подшипников рассматриваем как структурный параметр технического состояния подшипников.

В соответствии с правилами научного эксперимента производим расчет ошибок приборов и инструментов, проверку воспроизводимости и исключение ошибок измерений [Сиваков и др., 2021].

Определим точность измерения температуры в зависимости от ошибки пирометра по температуре, систематической ошибки измерения по расстоянию l от пирометра до поверхности корпуса подшипниковой опоры и систематической погрешности по отклонению угла α луча пирометра от поверхности корпуса.

Примем следующие исходные данные:

- расстояние от пирометра до поверхности корпуса подшипника $l = 800\text{--}1000$ мм;
- луч пирометра к вертикальной поверхности корпуса подшипника направлен под углом $\alpha = 85\text{--}95^\circ$.
- диапазон измерения температуры корпуса подшипника $t = 64\text{--}120$ °С.

Для измерения расстояния примем метровую линейку (рулетку) с минимальной ценой деления $\Delta l = 1$ мм.

При измерении угла α принимаем, что торцовые стенки корпусов подшипников перпендикулярны лучу пирометра. Отклонение луча пирометра от горизонтали относительно вертикальной торцовой стенки корпуса определяем по жидкостному уровню с ценой деления в 1° .

На пирометре Тем Про указан класс точности 2. Абсолютную допустимую систематическую ошибку пирометра определяем по формуле (ГОСТ 8.401–80, с. 249–261):

$$\delta_1 = \frac{E_y T_N}{100\%} = \frac{2 \cdot 120}{100} = 2,4^\circ \text{C}, \quad (1)$$

где $E_y = 2\%$ – приведенная допустимая систематическая ошибка от номинального значения измеряемой температуры; $T_N = 120^\circ \text{C}$ – номинальное значение измеряемой температуры.

Относительную допускаемую систематическую ошибку пирометра определяем по формуле [Чарыков, 1984]

$$P_1 = \frac{\delta_1}{T_{\min}} 100\% = \frac{2,4}{64} \cdot 100 = 3,75\%, \quad (2)$$

где $T_{\min} = 64^\circ \text{C}$ – минимальное значение измеряемой температуры.

Относительная систематическая ошибка измерения расстояния по формуле (2)

$$P_2 = \frac{\Delta l}{l_{\min}} 100\% = \frac{5}{800} \cdot 100 = 0,625\%,$$

где $\Delta l = 5$ мм – принятая ошибка при измерении расстояния рулеткой; $l_{\min} = 800$ мм – минимальное расстояние от пирометра до корпуса подшипника.

Относительную систематическую ошибку угла отклонения луча пирометра от вертикальной поверхности корпуса определяем по формуле (2)

$$P_3 = \frac{\Delta \alpha}{\alpha_{\min}} 100\% = \frac{1}{85} \cdot 100 = 1,18\%,$$

где $\Delta \alpha = 1^\circ \text{C}$ – принятая при измерении ошибка жидкостного уровня; $\alpha_{\min} = 85^\circ \text{C}$ – отклонение горизонтального луча пирометра от вертикальной поверхности корпуса.

Общая систематическая ошибка измерений температуры

$$N = \sqrt{\sum_{i=1}^3 P_i^2} = \sqrt{3,75^2 + 0,625^2 + 1,18^2} = 3,98\%. \quad (3)$$

При выборе статистических характеристик определим доверительную вероятность $P \leq 100\% - N = 100 - 3,88 = 96,02\%$. Для удобства пользования таблицами статистических критериев Кохрена, Стьюдента и др. принимаем $P = 95\%$.

Расчет воспроизводимости температурного диагностирования.

При оценке воспроизводимости проверяют достоверность диагностических измерений. Если проверкой установлено, что диагностические измерения температуры воспроизводимы, организуют периодическое температурное диагностирование подшипников. Для диагностических измерений температуры, достоверность которых не подтверждается при оценке воспроизводимости, принимается решение по изменению схемы диагностирования или использованию других, более точных, методов измерений. Для оценки воспроизводимости эксперимента производят несколько коротких серий параллельных измерений для определения сходимости статистических характеристик выполненных измерений. Производим две серии параллельных опытов по измерению температуры подшипников СЦ при установившейся рабочей скорости машины. Интервал времени между сериями измерений принимаем равным семи часам. Результаты параллельных опытов, производимых при одинаковых факторах, сведены в табл. 1.

Таблица 1

Экспериментальные данные для проверки воспроизводимости опытов при измерении температуры подшипников с лицевой стороны сушильных цилиндров

Experimental data for testing the reproducibility of experiments at measuring the temperature of bearings on the front side of the drying cylinders

	Уровни температур подшипников СЦ в k параллельных опытах, °С							\bar{t}_j	S_j^2
	Номер СЦ								
	7	8	9	10	11	12	13		
$j = 1$	70	72	83	94	86	87	77	81,286	64,5
$j = 2$	74	73	86	91	89	82	76	81,57	46,5

Среднее арифметическое значение температуры определяем по формуле

$$\bar{t}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k t_{ij}; \quad j = \overline{1,2}, \quad (4)$$

где k – количество опытов в серии; j – номер параллельных серий.

Дисперсия значений температур в параллельных сериях

$$S_j^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (t_{ij} - \bar{t}_j)^2. \quad j = \overline{1,2}. \quad (5)$$

Расчетный критерий Кохрена определяем по формуле

$$G_p = (S_j^2)_{\max} / \sum_{j=1}^n S_j^2 = \frac{64,5}{64,5 + 46,5} = 0,58, \quad (6)$$

где $n = 2$ – количество серий опытов.

Из справочной таблицы (ГОСТ 8.401–80, с. 249–261) выбираем табличное значение критерия Кохрена G . При доверительной вероятности $P = 0,95$ при числе параллельных серий $N = 2$ и числе свободы $f = k - 1 = 7 - 1 = 6$ имеем $G = 0,677$.

В рассмотренном примере $G_p \leq G$, следовательно, опыт воспроизводим: можно выполнять диагностирование технического состояния подшипников по температуре их корпусов.

Если $G_p > G$, то диагностические измерения невоспроизводимы, а оценки дисперсий неоднородны: необходимо изменить метод диагностирования или применить более точные приборы.

Температурное диагностирование подшипников СЦ. Измерение температуры подшипников СЦ выполняли при рабочей скорости машины 457 м/мин. Температура подшипников СЦ измерялась с лицевой и приводной сторон. Измерения температуры произведены с торцевой стороны корпусов подшипников. Точка измерения температуры принята со стороны выхода тел качения из-под нагрузки (рис. 1).

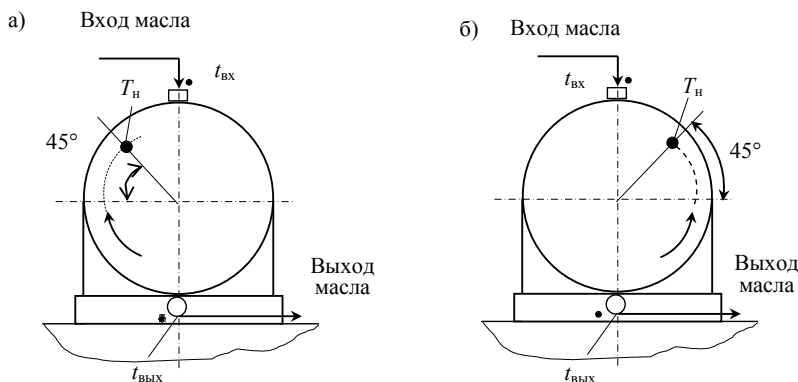


Рис. 1. Схема расположения точек измерения температуры подшипников сушильных цилиндров: а) для сушильных цилиндров нижнего ряда; б) верхнего ряда; T_n , T_b – положение точек измерения температуры корпуса

Fig. 1. The layout of the temperature measurement points of the bearings of the drying cylinders: а) for drying cylinders of the lower row; б) the upper row; T_n , T_b – position of the housing temperature measurement points

Поверхность корпуса подшипника в месте измерения температуры очищалась от загрязнений. Луч пирометра направлялся под прямым углом к поверхности корпуса подшипника. Расстояние от пирометра до корпуса подшипника принято 0,9 м.

Статистические характеристики температур корпусов однотипных подшипников определяем раздельно для групп сушильной части по пару и по сторонам (лицевой и приводной).

Измерения температуры произведены в контрольных точках корпусов подшипников три раза с интервалом в 1,5–2,0 мин. Средние значения измеренных температур представлены в табл. 2.

Таблица 2

Температура подшипников сушильных цилиндров в I, II и III группах по пару при скорости машины 457 м/мин

The temperature of the bearings of the drying cylinders in groups I, II and III by steam at a machine speed of 457 m/min

Номер сушильного цилиндра	Лицевая сторона	Приводная сторона
	$t_{\text{корпуса}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{корпуса}}, ^\circ\text{C}$
III сушильная группа		
1	63	77
2	62	81
3	65	71
4	67	67
5	70	71
6	77	82
II сушильная группа		
7	64	95
8	72	92
9	83	86
10	94	92
11	86	81
12	87	89
13	77	87
14	91	86
15	88	88

Окончание табл. 2

Номер сушильного цилиндра	Лицевая сторона	Приводная сторона
	$t_{\text{корпуса}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{корпуса}}, ^\circ\text{C}$
16	85	92
17	79	99
18	88	96
19	78	100
I сушильная группа		
20	88	99
21	88	93
22	91	88
23	82	82
24	94	91
25	78	86
26	94	91
27	84	94
28	88	98
29	79	92
30	96	92
31	83	118
32	96	101
33	84	99
34	98	102
35	78	97
36	97	101
37	78	97
38	89	77

Среднее арифметическое значение температур \bar{t} , $^\circ\text{C}$, определяли по формуле (4)

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i,$$

где n – количество СЦ в группе по пару; t_i – температура i -го подшипника, $^\circ\text{C}$.

Среднее квадратическое отклонение S_i , °С, i -х подшипников от \bar{t} определяли по формуле

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}. \quad (7)$$

Уточнение температур отдельных подшипников, имеющих значительные отклонения от температур по t-критерию Стьюдента. Ошибки происходят при исследованиях из-за нарушений эксперимента и обработки экспериментальных данных. Как ошибки рассматриваются уровни температур подшипников, значительно отклоняющиеся от среднего арифметического значения. Значение t_i^* , значительно отличающееся от \bar{t} , повторно измеряют и уточняют.

Вначале по формулам (5) и (6) рассчитываем для выборки \bar{t} и S^2 . Определяем расчетный критерий Стьюдента [Сиваков и др., 2021], как величину разности, выраженную в долях S , по формуле

$$t_p = |\bar{t} - t_i^*| / S. \quad (8)$$

Затем сравниваем значения критериев Стьюдента расчетного t_p и табличного t . Если $t_p \geq t$, то с вероятностью вывода, соответствующей $P = 95\%$, можно считать, что отклоняющееся значение t_i^* является температурой неработоспособного подшипника или содержит грубую ошибку.

Повторно измерена и уточнена температура следующих подшипников СЦ: 1, 2, 6, 7, 14, 31, 38. Уточненные значения температур проверены по (8); нарушений условий эксперимента и ошибок не обнаружено. Подшипники СЦ 1, 2, 7 с лицевой стороны и 38 с приводной стороны имеют пониженные уровни температур. Подшипники СЦ 6, 14 с лицевой стороны и 31 с приводной стороны имеют повышенные уровни температур.

Расчет статистически допустимых уровней температур подшипников СЦ. Средние арифметические значения температур \bar{t} и средние квадратические отклонения корпусов подшипников σ , рассчитанные по формулам (4) и (7), приведены в табл. 3.

Допустимую температуру подшипников определяем по формуле

$$|t| = \bar{t} \pm t_c S, \quad (9)$$

где t_c – квантиль t -распределения Стьюдента, t_c принимаем из [Муромцев, 1990], при доверительной вероятности $p = 0,9$ и числе степеней свободы $f = n - 1$, где n – количество обследованных корпусов подшипников в группе сушильной части по пару.

Таблица 3

Средние арифметические значения и средние квадратические отклонения температур подшипников

Arithmetic averages and quadratic averages bearing temperature deviations

Номер сушильной группы по пару	Сторона машины	Среднее арифметическое значение \bar{t} , °С,	Среднее квадратическое отклонение S , °С
III	Лицевая	67,30	5,05
	Приводная	74,83	5,55
II	Лицевая	82,46	7,94
	Приводная	91,00	5,32
I	Лицевая	87,89	6,93
	Приводная	94,63	8,50

Для подшипников групп сушильной части по пару имеем:

III группа	при $f = 5$	коэффициент $t_c = 2,01$
II группа	при $f = 12$	коэффициент $t_c = 1,78$
I группа	при $f = 18$	коэффициент $t_c = 1,73$

Допустимые максимальные $|t|_{\max}$ и минимальные $|t|_{\min}$ уровни температур однотипных подшипников для сушильных групп, определенные по формуле (9), равны:

III группа	лицевая сторона	$ t _{\max} = 72$	$ t _{\min} = 62$
	приводная сторона	$ t _{\max} = 86$	$ t _{\min} = 64$
II группа	лицевая сторона	$ t _{\max} = 96$	$ t _{\min} = 68$
	приводная сторона	$ t _{\max} = 101$	$ t _{\min} = 80$
I группа	лицевая сторона	$ t _{\max} = 100$	$ t _{\min} = 76$
	приводная сторона	$ t _{\max} = 109$	$ t _{\min} = 80$

Графики диагноза температур подшипников СЦ [Сиваков и др., 2019] приведены на рис. 2–4.

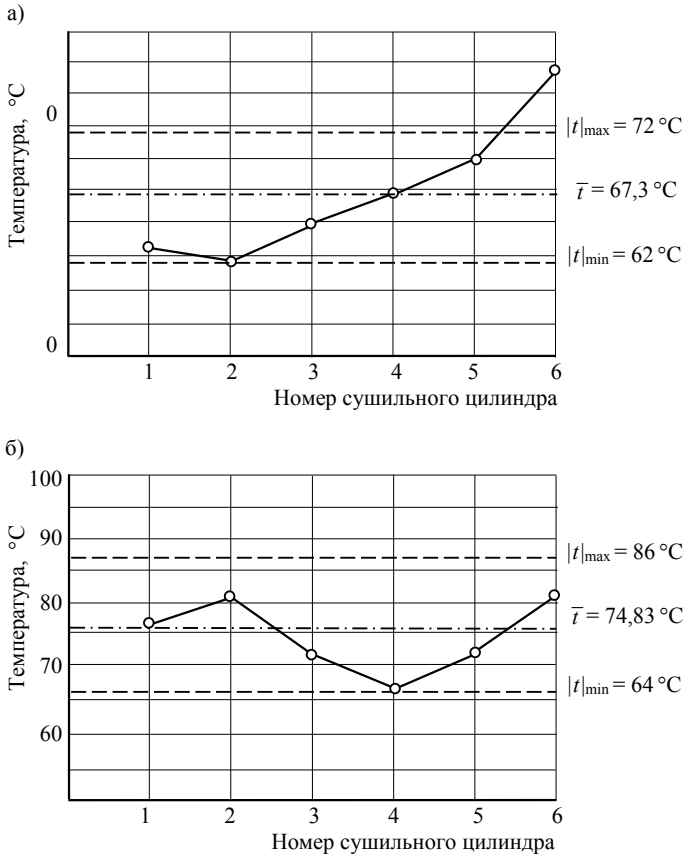


Рис. 2. График диагноза температур подшипников сушильных цилиндров а) лицевой и б) приводной сторон III группы по пару: $|t|_{\min}$, $|t|_{\max}$ – минимально и максимально допустимые уровни температуры; \bar{t} – среднее арифметическое значение температур

Fig. 2. Temperature diagnosis graph of drying cylinder bearings а) of front and б) drive sides of group III by steam: $|t|_{\min}$, $|t|_{\max}$ – minimum and maximum permissible temperature levels; \bar{t} – arithmetic mean of temperatures

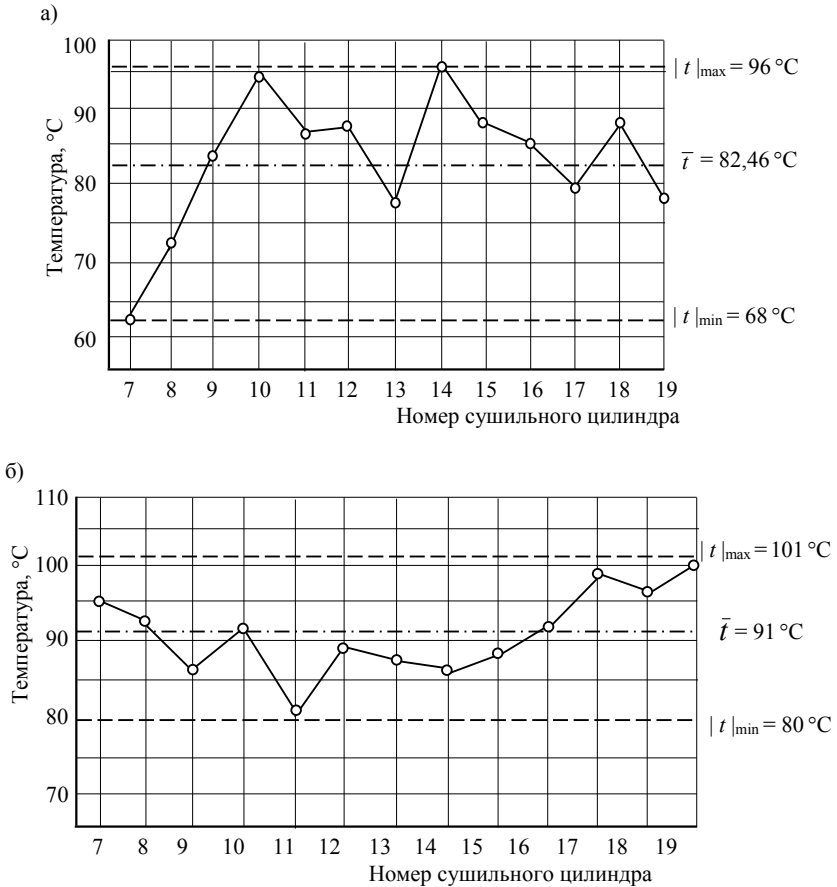


Рис. 3. График диагноза температур подшипников сушильных цилиндров
 а) лицевой и б) приводной сторон II группы по пару: $|t|_{\min}$, $|t|_{\max}$ –
 минимально и максимально допустимые уровни температуры;
 \bar{t} – среднее арифметическое значение температур

Fig. 3. Temperature diagnosis graph of drying cylinder bearings
 a) the front and b) drive sides of group II by steam: $|t|_{\min}$, $|t|_{\max}$ – minimum
 and maximum permissible temperature levels; \bar{t} – arithmetic mean
 of temperatures

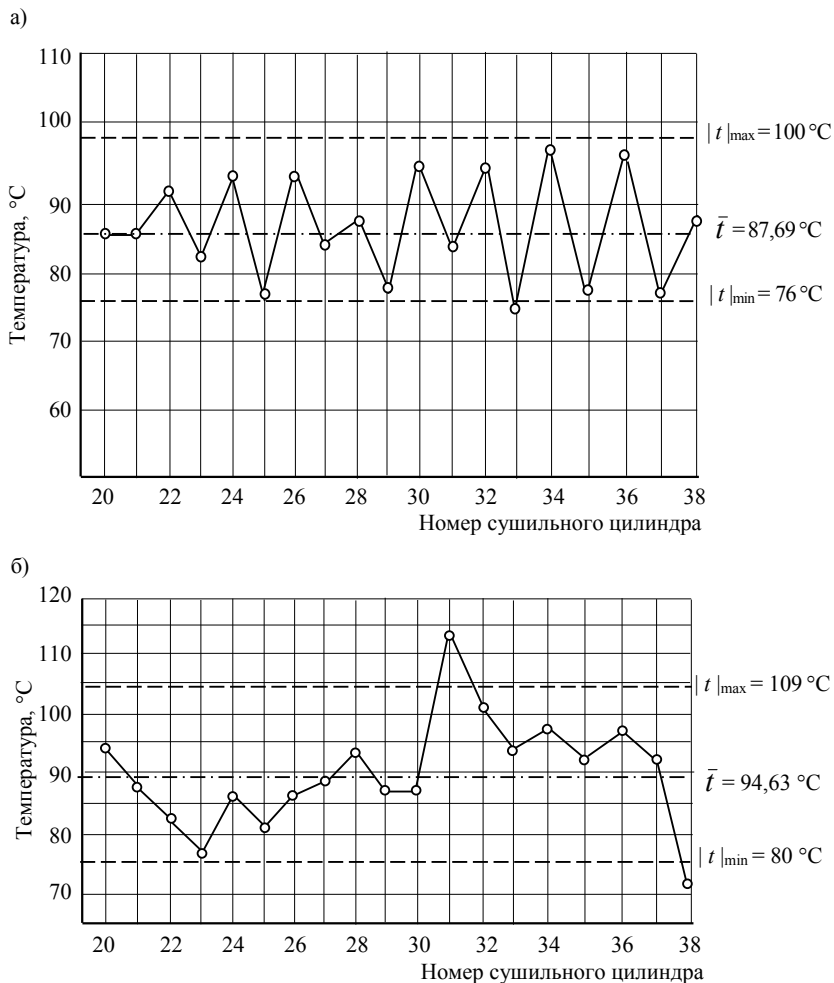


Рис. 4. График диагноза температур подшипников сушильных цилиндров а) лицевой и б) приводной сторон I группы по пару: $|t_{\min}, |t_{\max}$ – минимально и максимально допустимые уровни температуры; \bar{t} – среднее арифметическое значение температур

Fig. 4. Temperature diagnosis graph of drying cylinder bearings a) the front and b) drive sides of group I by steam $|t_{\min}, |t_{\max}$ – minimum and maximum permissible temperature levels; \bar{t} – arithmetic mean of temperatures

Допустимые верхняя и нижняя границы температур расчленяют массив уровней температур подшипников на зоны: «допустимо», между критериями $|t|_{\min}$ и $|t|_{\max}$; «недопустимо», расположенных вне зоны «допустимо». Для подшипников при оценке «недопустимо», превышающей $|t|_{\max}$, следует увеличить подачу масла для охлаждения и предусмотреть ревизию при ближайшем планово-предупредительном ремонте. Подшипники с оценкой «недопустимо», расположенные ниже $|t|_{\min}$, работают с пониженной температурой из-за высокого расхода масла для охлаждения. Следует снизить подачу масла в эти подшипники.

Выводы

Пирометры, имеющие класс 2 точности измерения температуры, обеспечивают доверительную вероятность $P = 0,95$.

Расчетом установлено и экспериментально проверено, что методика температурного диагностирования обеспечивает воспроизводимость и может быть рекомендована для контроля технического состояния подшипников СЦ.

Уровни температур отдельных подшипников, значительно отличающиеся от табличных данных критерия Стьюдента и др., можно рассматривать как первый этап диагностирования, выделяющий неработоспособные подшипники из общего массива.

Таким образом, разработаны метод и алгоритм температурного диагностирования подшипников СЦ, выполнены диагностические измерения и рассчитаны допустимые уровни температур подшипников при двухстороннем ограничении. По допустимым уровням температур произведена оценка технического состояния подшипников. Обнаружено четыре подшипника, имеющие оценку «недопустимо».

Библиографический список

Балицкий Ф.Я., Иванова М.А., Соколова А.Г. и др. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов. М.: Наука, 1984. 119 с.

Муромцев Ю.Л. Безаварийность и диагностика нарушений в химических производствах. М.: Химия, 1990. 143 с.

Сиваков В.П., Вихарев С.Н., Вихарева Ю.С. Динамика ротора дисковой мельницы // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 7. С. 148–150.

Сиваков В.П., Вураско А.В., Вихарев С.Н. Допустимые параметры вибрации при диагностировании оборудования // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 5. С. 25–30. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-5-25-30

Сиваков В.П., Вураско А.В., Вихарев С.Н. Периодичность диагностирования оборудования при вибрационном контроле // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 8. С. 24–28. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-8-24-28.

Сиваков В.П., Вураско А.В., Гарифьянов Р.М. Расчет пропиточной колонны на сейсмическую устойчивость // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 9. С. 34–43. DOI: 10.31044/1684-2561-2021-0-9-34-43.

Сиваков В.П., Вураско А.В., Куцубина Н.В. Экспериментальное и теоретическое исследование тепловых потерь в сушильных цилиндрах // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2021. № 2 (380). С. 169–179. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-169-179.

Сиваков В.П., Вураско А.В., Леонович А.А. Основы научных исследований химической и механической переработки растительного сырья. Екатеринбург: УГЛТУ, 2021. 168 с.

Сиваков В.П., Вураско А.В., Музыкантова В.И. Определение содержания конденсата в сушильных цилиндрах по температуре их охлаждения // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 9. С. 19–23. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-9-19-23.

Сиваков В.П., Вураско А.В., Музыкантова В.И., Гарифьянов Р.М. Диагностирование подшипников сушильных цилиндров по температуре системы циркуляционной смазки // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2019. № 11. С. 21–25. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-11-21-25.

Сиваков В.П., Вураско А.В., Юдаев Д.Д. Деформации сушильных цилиндров при крепировании бумаги и методы их устранения // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. № 232. С. 196–207. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.196-207.

Сиваков В.П., Музыкантова В.И., Гребенчиков М.Ю. Диагностирование засорения сит питателя высокого давления варочного котла // Лесной журнал. 2015. № 1 (343). С. 144–151.

Чарыков А.К. Математическая обработка результатов химического анализа. Л.: Химия, 1984. 168 с.

References

Balickij F.YA., Ivanova M.A., Sokolova A.G. i dr. Vibroakustiche-skaya diagnostika zarozhdayushchihsvya defektov. M.: Nauka, 1984. 119 p. (In Russ.)

Charykov A.K. Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov himicheskogo analiza. L.: Himiya, 1984. 168 p. (In Russ.)

Muromcev Yu.L. Bezavarijnost' i diagnostika narushenij v himicheskikh proizvodstvah. M.: Himiya, 1990. 143 p. (In Russ.)

Sivakov V.P., Viharev S.N., Vihareva Yu.S. Dinamika rotora diskovoj mel'nicy. Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta, 2012, vol. 15, no. 7, pp. 148–150. (In Russ.)

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Viharev S.N. Dopustimye parametry vibracii pri diagnostirovaniy oborudovaniya. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya*, 2019, no. 5, pp. 25–30. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-5-25-30. (In Russ.)

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Viharev S.N. Periodichnost' diagnostirovaniya oborudovaniya pri vibracionnom kontrole. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya*, 2019, no. 8, pp. 24–28. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-8-24-28. (In Russ.)

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Garifyanov R.M. Raschet propitochnoj kolonny na sejsmicheskuyu ustojchivost'. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya*, 2021, no. 9, pp. 34–43. DOI: 10.31044/1684-2561-2021-0-9-34-43. (In Russ.)

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Kucubina N.V. Eksperimental'noe i teoreticheskoe issledovanie teplovyh poter' v sushil'nyh cilindrah. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal*, 2021, no. 2 (380), pp. 169–179. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-169-179. (In Russ.)

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Leonovich A.A. Osnovy nauchnyh issledovaniy himicheskoy i mekhanicheskoy pererabotki rastitel'nogo syr'ya. Ekaterinburg: UGLTU. 2021. 168 p. (In Russ.)

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Muzykantova V.I. Opredelenie sodержa-niya kondensata v sushil'nyh cilindrah po temperature ih ohlazhde-niya. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya*, 2019, no. 9, pp. 19–23. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-9-19-23. (In Russ.)

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Muzykantova V.I., Garifyanov R.M. Diagnostirovanie podshpnikov sushil'nyh cilindrov po temperature sistemy cirkulyacionnoj smazki. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya*, 2019, no. 11, pp. 21–25. DOI: 10.31044/1684-2561-2019-0-11-21-25. (In Russ.)

Sivakov V.P., Vurasko A.V., YUdaev D.D. Deformacii sushil'nyh cilindrov pri krepirovanii bumagi i metody ih ustraneniya. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2020, iss. 232, pp. 196–207. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.196-207. (In Russ.)

Sivakov V.P., Muzykantova V.I., Grebenschikov M.Yu. Diagnostirovanie zasoreniya sit pitatelya vysokogo davleniya varochnogo kotla. *Lesnoj zhurnal*, 2015, no. 1 (343), pp. 144–151. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 16.11.2021

Сиваков В.П., Вураско А.В., Исаева К.С. Температурное диагностирование подшипников сушильных цилиндров картоноделательной машины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 238. С. 185–202. DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.185-202

Цель исследования – разработка метода расчета допустимых уровней температур подшипников сушильных цилиндров и применение допустимых

уровней температур для оценки технического состояния подшипников. За период времени наработки изнашивание трущихся поверхностей деталей подшипников сопровождается образованием и развитием дефектов. Дефекты увеличивают силы трения между трущимися деталями и температуру подшипников. Температуру корпусов подшипников рассматриваем как структурный параметр технического состояния подшипника. Выполнены экспериментальные исследования температуры подшипников сушильных цилиндров при установившемся режиме работы картоноделательной машины. Произведен расчет общей ошибки измерения приборов и инструментов. Установлена проверка воспроизводимости температурного диагностирования. Уточнены отклоняющиеся уровни температур отдельных подшипников обследованного массива. Расчетом определены средние и допустимые уровни температур подшипников раздельно с лицевой и приводной сторон сушильных групп по пару, подаваемому в сушильные цилиндры. По обработанным данным экспериментальных исследований установлено, что подшипники с лицевой стороны в каждой из групп по пару имеют среднеарифметический уровень температуры на 7–9 °С ниже, чем с приводной стороны. Среднеарифметический уровень температуры подшипников сушильных цилиндров возрастает от третьей группы по пару к первой. Между смежными группами разность температур составляет 5–9 °С, а между первой и третьей группами достигает 20–21 °С. Таким образом, разработан и апробирован метод температурного диагностирования подшипников сушильных цилиндров картоноделательной машины. Выполнены диагностические измерения и рассчитаны допустимые уровни температур подшипников при двухстороннем ограничении. По допустимым уровням температур произведена оценка технического состояния подшипников. Обнаружено четыре подшипника, имеющие оценку «недопустимо». Предложенный метод температурного диагностирования удовлетворяет условиям воспроизводимости и обеспечивает обнаружение неисправных подшипников в режиме эксплуатации оборудования.

Ключевые слова: сушильная часть, температура, подшипники, сушильные цилиндры, диагностирование, эксперимент.

Sivakov V.P., Vurasko A.V., Isaeva K.S. Temperature diagnostics of bearings drying cylinders of the cardboard making machine. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoi Akademii*, 2022, iss. 238, pp. 185–202 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2022.238.185-202

The object of work is the bearings of the drying cylinders of the cardboard-making machine. The subject of the work is temperature diagnostics of the technical condition of the bearings of drying cylinders. The purpose is to develop a method for calculating the permissible temperature levels of bearings of drying cylinders and the

use of permissible temperature levels to assess the technical condition of bearings. During the period of operating time, the wear of the rubbing surfaces of bearing parts is accompanied, by the formation and development of defects. Defects increase the friction forces between the rubbing parts and the temperature of the bearings. The temperature of the bearing housings is considered as a structural parameter of the technical condition of the bearing. Experimental studies of the temperature of the bearings of drying cylinders under the steady-state operation of the cardboard-making machine have been carried out. The calculation of the total measurement error of instruments and instruments was made. The reproducibility of temperature diagnostics was established by checking. The deviating temperature levels of individual bearings of the examined array have been clarified. The calculation determines the average and permissible temperature levels of bearings separately from the front and drive sides of the drying groups for steam supplied to the drying cylinders. According to the processed data of experimental studies it was found that the bearings on the front side in each of the groups of pairs have an arithmetic mean temperature level 7...9 °C lower, than on the drive side. The arithmetic mean temperature level of the bearings of drying cylinders increases from the third group of steam to the first. The temperature difference between adjacent groups is 5...9 °C, and between the first and third groups reaches 20...21 °C. Thus, a method of temperature diagnostics of bearings of drying cylinders of a cardboard-making machine has been developed and tested. Diagnostic measurements were carried out and the permissible temperature levels of bearings with two-way restriction were calculated. According to the permissible temperature levels, the technical condition of the bearings was assessed. 4 bearings with the rating "unacceptable" were found. The proposed method of temperature diagnostics satisfies the conditions of reproducibility and ensures the detection of faulty bearings in the operating mode of the equipment.

Key words: drying part, temperature, bearings, drying cylinders, diagnostics, experiment

СИВАКОВ Валерий Павлович – профессор кафедры технологических машин и технологии машиностроения Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук, профессор.

620100. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: sivakovvp@m.usfeu.ru

SIVAKOV Valeriy P. – DSc (Technical), Professor Department of Technological Machines and Mechanical Engineering Technology Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: sivakovvp@m.usfeu.ru

ВУРАСКО Алеся Валерьевна – заведующая кафедрой технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук, профессор.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: vurasko2010@yandex.ru

VURASKO Alesya V. – DSc (Technical), Professor of the department technology of pulp and paper industries and polymer processing of the Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: vuras-ko2010@yandex.ru

ИСАЕВА Ксения Сергеевна – соискатель ученой степени кандидата технических наук Уральского государственного лесотехнического университета.

620100, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия. E-mail: isaeva.kseniya.98@mail.ru

ISAEVA Kseniya S. – PhD student, Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract str. 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: isaeva.kseniya.98@mail.ru