

**В.П. Сиваков, А.В. Вураско**

## **КОНТРОЛЬ КОНДЕНСАТА В СУШИЛЬНЫХ ЦИЛИНДРАХ ПО ТРЕНДУ ТЕМПЕРАТУРЫ ИХ ОХЛАЖДЕНИЯ**

*Введение.* При групповой системе пароснабжения и удаления конденсата в сушильных цилиндрах (СЦ) установлены подпорные дроссельные шайбы. Дроссельные шайбы имеют нерегулируемый условный проход<sup>1</sup>. По этой причине, а также при нарушении теплового и гидравлического режимов работы в СЦ происходит накопление конденсата, что увеличивает термическое сопротивление теплому потоку от конденсирующегося пара к стенкам СЦ. Разработка методов обнаружения и устранения повышенного содержания конденсата в СЦ актуальна для снижения расхода пара на сушку бумажного полотна.

Цель работы – разработка метода контроля конденсата в СЦ. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи: определение допустимого и предельных отклонений трендов температуры от среднего арифметического; обнаружение повышенного содержания конденсата по тренду температуры охлаждения.

*Методика исследования.* Для обнаружения СЦ с повышенным содержанием конденсата в настоящей работе применен температурный контроль охлаждения СЦ при останове сушильной части. Известно, что теплоемкость СЦ, содержащих повышенный объем конденсата, значительно превышает теплоемкость СЦ без конденсата. Охлаждение СЦ с повышенным уровнем конденсата происходит медленнее, чем в среднем в группе СЦ по пару [Куров и др., 2017]. По тренду температуры охлаждения скорость снижения температуры после прекращения подачи пара можно выявить СЦ с повышенным содержанием конденсата, принять меры по устранению неполадок в системе отвода конденсата и снизить расход пара на сушку бумажного полотна.

Первое измерение температуры стенок торцовых крышек СЦ производим при установившемся режиме работы бумагоделательной машины за 30...60 мин до останова. Последующие 4 измерения температуры торцо-

---

<sup>1</sup> Теория и конструкция машин и оборудования отрасли. Бумагоделательные и картоноделательные машины : учеб. пособие / под ред. В.С. Курова, Н.Н. Кокушина. СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2011. 588 с.

вых крышек производим после прекращения подачи пара в СЦ при оставше сушительной части с интервалами 40 мин.

Для контроля температуры 25-ти СЦ бумагоделательной машины применен пирометр TemPro300 с диапазоном измерения от  $-50$  до  $+380$  °С. Измерения температур (длительность 2...5 мин) произведены с лицевой стороны машины на расстоянии в 1 м под прямым углом к поверхности торцовых крышек. Поверхность СЦ по месту измерения температуры тщательно очищали от загрязнений.

При обработке измеренных значений температуры<sup>2</sup> [Сиваков и др., 2019] произведено исключение грубых ошибок эксперимента по  $t$ -критерию Стьюдента. Проверка температур на грубую ошибку произведена по нижней границе диапазона измеренных значений, так как СЦ с повышенным содержанием конденсата имеют пониженную температуру и остывают медленно.

*Результаты исследования.* Выполнены расчеты среднего арифметического значения  $\bar{t}$  и среднего квадратического отклонения  $\sigma$  для первого измерения выборки  $\bar{t}$  по формулам:

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{1}{25} \sum_{i=1}^{25} t_i = 116,2 \text{ °С}; \quad (1)$$

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

где  $n$  – число обследованных СЦ;  $t_i$  – значение температуры  $i$ -го СЦ.

Расчетный критерий Стьюдента определяем по формуле

$$t_{pi} = |\bar{t} - t_i^*| / \sigma, \quad (3)$$

где  $t_i^*$  – минимальные измеренные значения температур  $i$ -х СЦ, значительно отклоняющиеся от  $\bar{t}$ .

Проверены значения для СЦ №7, 21 и 25:  $t_7^* = t_{21}^* = 109$  °С;  $t_{25}^* = 65$  °С.

Из табл. 2 определяем значение  $t_c$ -критерия Стьюдента при доверительной вероятности  $p = 0,9$  и числе степеней свободы  $a m - 1 = 24$ , получаем  $t_c = 1,72$ . Производим сравнение критериев:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{pi} \geq t_c \\ t_{pi} < t_c \end{array} \right\}. \quad (4)$$

Из сравнения:  $t_{p25} > t_c$  или  $5,82 > 1,72$ , в соответствии с (4), измеренное значение температуры СЦ №25 равно  $65$  °С – грубая ошибка.

<sup>2</sup> Леонович А.А., Сиваков В.П., Вураско А.В. Основы научных исследований химической и механической переработки растительного сырья: Учеб. пособие. УГЛУ. 2010. 167 с.

Из сравнения  $t_{p7}$  и  $t_c$  (или 0,82 и 1,72) видно, что  $0,82 < 1,72$ , следовательно, нет достаточных оснований для исключения значений температур СЦ №7 и №21 из выборки. Значение температуры СЦ №25 равное  $65\text{ }^\circ\text{C}$  исключаем из исследуемой выборки и дальнейших расчетов. Производим пересчет  $t$  и  $\sigma$  при  $n = 24$ .

По формулам (1)–(4) произведена аналогичная проверка измеренных значений выборок следующих 4 измерений температур при охлаждении СЦ. Грубых ошибок измерений не обнаружено. Производим расчет допустимых уровней первого измерения температуры по формулам:

$$|t|_{\max} = \bar{t} + t_c\sigma = 116,2 + 1,72 \cdot 8,8 = 131\text{ }^\circ\text{C}; \quad (5)$$

$$|t|_{\min} = \bar{t} - t_c\sigma = 116,2 - 1,72 \cdot 8,8 = 98\text{ }^\circ\text{C}.$$

Статистические, измеренные и расчетные граничные значения температур выборки приведены на рис. 1.

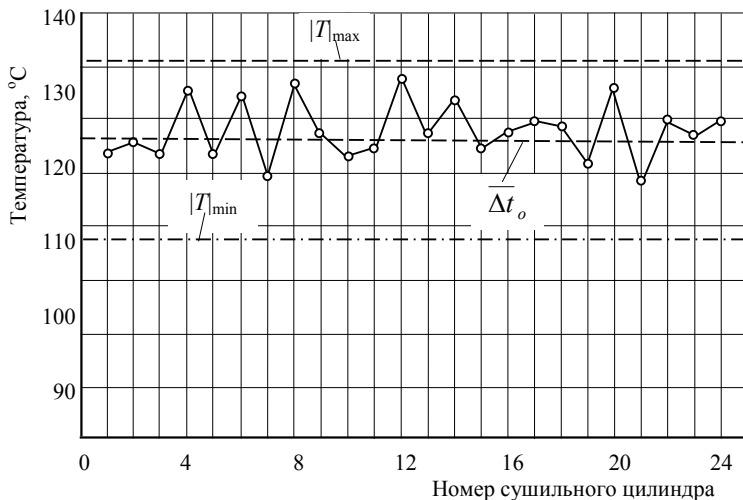


Рис. 1. Схема статистических, измеренных и граничных значений температур СЦ выборки  $|T|_{\min}$ ,  $|T|_{\max}$  – минимально и максимально допустимые уровни температуры;  $\bar{t}_o$  – среднее арифметическое значение температур СЦ

Fig. 1. Diagram of statistical, measured, and boundary values sample DC temperatures  $|T|_{\min}$ ,  $|T|_{\max}$  – minimum and maximum permissible temperature levels;  $\bar{t}_o$  – arithmetic mean of the temperature of the DC

Для исследования охлаждения СЦ после прекращения подачи пара произведены четыре последовательных измерения их температур с интервалами охлаждения  $\Delta\tau$  в 40 мин.

Тренд  $V_i$  охлаждения СЦ определяли по формуле

$$V_i = t_{ин} - t_{ик} / \Delta\tau. \text{ } ^\circ\text{C/мин}, \quad (6)$$

где  $t_{ин}$ ,  $t_{ик}$  – начальная и конечная температура  $i$ -го СЦ в исследуемом интервале температур.

Среднее арифметическое значение трендов температур для каждого интервала охлаждения определяли по формуле

$$\bar{V} = \frac{1}{n\Delta\tau} \sum_{i=1}^n \Delta t_i.$$

Среднее квадратическое значение тренда температур для каждого интервала охлаждения определяли по формуле

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{1}{n\Delta\tau^2} \sum_{i=1}^n (\Delta t_i - \bar{\Delta t})^2}.$$

Допустимые максимальные  $|\Delta V|_{\max}$  и минимальные  $|\Delta V|_{\min}$  значения градиентов температур для каждого из интервалов охлаждения определяли по формуле

$$|\bar{V}|_{\max} = \bar{V} + t_c \sigma_v; \quad |\bar{V}|_{\min} = \bar{V} - t_c \sigma_v. \quad (7)$$

Расчетные характеристики трендов температур сушильных групп по пару по интервалам периода охлаждения приведены в таблице.

**Расчетные характеристики трендов температур сушильных групп по пару во время охлаждения**

**Design characteristics of the temperature gradients of the drying groups across steam during cooling**

Характеристики трендов температуры, $^\circ\text{C/мин}$	Номер групп по пару	Тренд температур СЦ при охлаждении, мин				
		0-40	40-80	80-120	120-160	
Среднее арифметическое значение $\bar{V}_i$ , $i = 1, 2, 3$	3	0,65	0,90	0,30	0,17	
	2	0,48	0,55	0,35	0,20	
	1	0,55	0,25	0,20	0,17	
Среднее квадратическое значение $\sigma_{vi}$ , $i = 1, 2, 3$	3	0,33	0,40	0,04	0,038	
	2	0,07	0,13	0,07	0,067	
	1	0,17	0,06	0,04	0,04	
Допустимые уровни:	$ \Delta V _{\max}$	3	1,60	2,00	0,42	0,32
		2	2,62	0,80	0,49	0,35
		1	0,65	0,38	0,33	0,30
	$ \Delta V _{\min}$	3	0,95	0,25	0,18	0,12
		2	0,33	0,27	0,22	0,15
		1	0,18	0,14	0,12	0,10

Графики изменения расчетных характеристик градиентов температур СЦ за время охлаждения по интервалам для первой группы приведены на рис. 2. Из графиков следует, что за период охлаждения в 160 мин среднее арифметическое значение  $\bar{V}_i$  снизилось в два раза с 0,375 до 0,187 °С. Цилиндры № 15, 21 имеют более низкий тренд температур. Тренды температуры СЦ № 15, 21 за период охлаждения снизились с  $V = 0,17$  до  $V = 0,13$  только в 1,4 раза. График тренда температуры СЦ № 21 показан на рис. 2.

Пониженные тренды температур СЦ № 15, 21 можно объяснить неисправностью системы удаления конденсата.

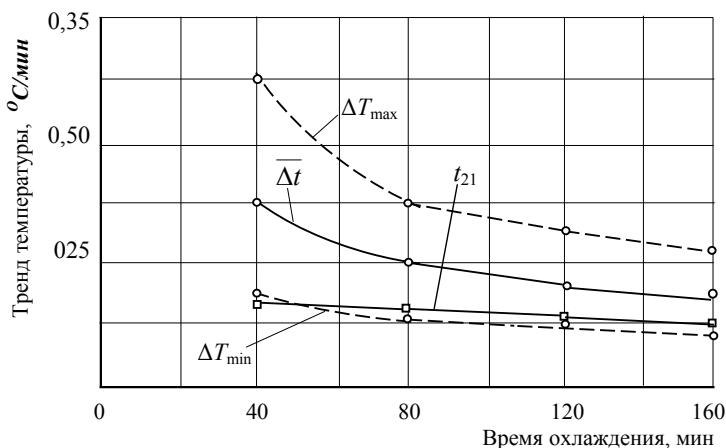


Рис. 2. Зависимость трендов температуры от времени охлаждения СЦ первой группы по паре:  $\bar{V}$  – среднее арифметическое значение;  $|V|_{max}$ ,  $|V|_{min}$  – допустимые верхний и нижний уровни;  $t_{21}$  – тренд температуры СЦ № 21 с повышенным содержанием конденсата

Fig. 2. The dependence of temperature trends from the time of cooling DC of the first group by pair:  $\bar{V}$  – arithmetic mean;  $|V|_{max}$ ,  $|V|_{min}$  – acceptable upper and lower levels;  $t_{21}$  – temperature trend of DC № 21 with increased content of the condensate

### Выводы

Разработана методика контроля конденсата в СЦ по тренду температуры их охлаждения.

Создан и апробирован алгоритм расчета допустимых уровней трендов температур охлаждения СЦ.

При контроле трендов температур охлаждения по предложенному алгоритму обнаружены два СЦ с повышенным содержанием конденсата.

### Библиографический список

Машины для производства бумаги и картона / под ред. В.С. Курова, Н.Н. Кокушина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. 646 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.

### References

Machines for production of paper and card / ed. by V.S. Kurova, N.N. Kokosina. SPb.: Publishing house of Polytechnical University 2017. 646 p.

Sivakov V.P., Vurasko A.V. Determination of condensate content in drying cylinders by temperature of their cooling. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*, 2019, no. 9, pp. 19–23.

*Материал поступил в редакцию 12.04.2020*

---

**Сиваков В.П., Вураско А.В.** Контроль конденсата в сушильных цилиндрах по тренду температуры их охлаждения // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 231. С. 252–259. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.231.252-259

Дроссельные шайбы, применяемые в сушильных цилиндрах (СЦ) для выпуска конденсата, имеют нерегулируемый условный проход, что приводит при интенсификации теплового и гидравлического режимов работы к накоплению конденсата. Повышенное содержание конденсата в СЦ увеличивает термическое сопротивление тепловому потоку от конденсирующегося пара к внутренним стенкам СЦ. Разработка методов обнаружения повышенного содержания конденсата в отдельных цилиндрах актуальна для снижения расхода пара на сушку бумаги. Выполнены исследования трендов температуры СЦ (скорости изменения температуры по времени, °С/мин) за период охлаждения после отключения подачи пара. Выбраны диагностические точки контроля и обоснован режим измерения температур в этих точках СЦ. Произведено исключение грубых ошибок экспериментов. Разработана методика и алгоритм расчета допустимых уровней трендов температур. Выполнены расчеты допустимых характеристик трендов температур за время интервалов охлаждения СЦ. По трендам температур определены СЦ с повышенным содержанием конденсата. Разработанный авторами метод и алгоритм расчета допустимых трендов температур охлаждения СЦ при останове машины, основанный на различиях в скорости охлаждения СЦ с конденсатом и без конденсата, теоретически обоснован и экспериментально апробирован в производственных

условиях. Обнаружение СЦ с повышенным содержанием конденсата по данному методу можно производить параллельно с другими работами по технологическому и техническому обслуживанию сушильных частей бумагоделательных машин.

**Ключевые слова:** сушильный цилиндр, конденсат, тренд температуры, охлаждение, допустимый тренд температуры.

**Sivakov V.P., Vurasko A.V.** The control of condensate in the dryer cylinders by their temperature gradient coolings. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehneskoj Akademii*, 2020, is. 231, pp. 252–259 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2020.231.252-259

Throttle washers used in drying cylinders (DC) for condensate release have an unregulated conditional passage, which leads to the accumulation of condensate during the intensification of thermal and hydraulic modes. The condensate accumulates in DS due to the tolerances of the scale uneven. The increased condensate content in the DC increases the thermal resistance to the heat flow from the condensing steam to the internal walls of the DC. Studies of temperature gradients during the cooling period after the steam supply to the drying cylinders has been performed. The method and algorithm of calculation of permissible levels of temperature gradients are developed. Drying cylinders with increased condensate level were determined. The development of methods for detecting increased condensate content in individual cylinders is relevant for reducing the steam consumption for paper drying. Studies of temperature gradients of the DC during the cooling period after the steam supply was switched off in the drying part of the boom-making machine were performed. Diagnostic control points are selected and the temperature measurement mode in the DC these points is justified. The exception of gross errors of experiments on the t-criterion Student's was made. A method and algorithm for calculating the permissible levels of temperature gradients and the minimum and maximum permissible temperature deviations of the surveyed SCS has been developed. A graph is constructed for detecting and excluding rough measurement errors from the sample. Calculations of permissible characteristics of temperature gradients during cylinder cooling intervals are performed. By temperature gradients during cooling intervals, DC with an increased condensate content are determined. The method and algorithm developed by the authors for calculating the permissible levels of cooling temperature gradients of the DC, when the machine is stopped, based on differences in the cooling rate of the DC with condensate and without condensate, is theoretically justified and experimentally tested in production conditions. Detection of DC with high condensate content using this method can be performed in parallel with other works on technological and technical maintenance of drying parts of paper machines.

**Keywords:** drying cylinder, condensate, temperature trend, cooling, permissible temperature trend.

**СИВАКОВ Валерий Павлович** – профессор кафедры теоретической механики и оборудования целлюлозно-бумажного производства Уральского государственного лесотехнического университета, доктор технических наук.

620100, ул. Сибирский тр., д. 37, г. Екатеринбург, Россия, E-mail: Sivakov.VP@yandex.r

**SIVAKOV Valeriy P.** – DSc (Technical), Professor department of technical and equipment of technology of pulp and paper industries Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: Sivakov.VP@yandex.ru

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

620100, ул. Сибирский тр., 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 Ural State Forest Engineering University.

620100. Siberian tract 37. Yekaterinburg. Russia. E-mail: Vurasko2010@yandex.ru