



УДК 676.056.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-169-179

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ В СУШИЛЬНЫХ ЦИЛИНДРАХ

В.П. Сиваков, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID:* [AAC-6084-2021](https://orcid.org/0000-0002-9387-1512),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9387-1512>

А.В. Вураско, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID:* [AAC-5594-2021](https://orcid.org/0000-0002-9471-085X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9471-085X>

Н.В. Куцубина, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID:* [AAC-4846-2021](https://orcid.org/0000-0002-0438-406X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0438-406X>

Уральский государственный лесотехнический университет, ул. Сибирский тракт, д. 37, г. Екатеринбург, Россия, 620100; e-mail: vurasko2010@yandex.ru, sivakov.VP@usfeu.ru, Nelly3416@mail.ru

Аннотация. Цель исследования – разработка методов определения тепловых потерь в сушильных цилиндрах. Экспериментальные исследования их температуры выполнены в сушильной части бумагоделательной машины при установившемся режиме работы. Определены средние, предельные и допустимые статистические характеристики температур сушильных цилиндров. По минимально-допустимым уровням температур выявлены сушильные цилиндры с повышенным содержанием конденсата и обоснован ремонт системы отвода конденсата для снижения тепловых потерь (расхода пара). Установлена причина неравномерной сухости бумажного полотна по ширине. Конденсатное кольцо на внутренней стенке по краям сушильных цилиндров приобретает утолщение из-за влаги, поступающей с торцевых крышек от действия центробежных сил. Конденсат выводят из сушильных цилиндров сифоном с приводной стороны. Поэтому на лицевой стороне сушильных цилиндров конденсатная пленка имеет большую толщину, чем на приводной стороне, а бумажное полотно просыхает хуже. Односторонний вывод конденсата и физический эффект центробежного сгона конденсата с торцевых крышек на боковую внутреннюю поверхность сушильных цилиндров приводят к тому, что бумажное полотно имеет меньшую сухость с лицевой стороны. Применение теплоизоляции торцевых крышек будет способствовать равномерной сухости по ширине бумажного полотна. Данные экспериментальных исследований температуры обработаны методами математической статистики для определения уровня тепловых потерь при контактной сушке бумажного полотна на сушильных цилиндрах от торцевых крышек к окружающему воздуху. Расчет тепловых потерь выполнен по уточненной методике исследования тепловых процессов при контактной сушке бумажного полотна. Установлено, что применение теплоизоляции торцевых крышек сушильных цилиндров обеспечивает снижение расхода пара на контактную сушку бумажного полотна без ущерба для технологического процесса. Результаты исследования можно применить для сокращения тепловых потерь в сушильной части бумагоделательных машин на цилиндрах, не имеющих теплоизоляции торцевых крышек. Например, для бумагоделательной машины, состоящей из 56 цилиндров диаметром 1500 мм, производительностью 7000 кг/ч абсолютно сухой бумаги, теплоизоляция их торцевых крышек экономит расход пара на сушку бумажного полотна до 223 кг/ч. Разработаны и апробированы методы обнару-

жения сушильных цилиндров с повышенным содержанием конденсата по допустимым уровням температуры и уточненный метод определения тепловых потерь при контактной сушке бумажного полотна на сушильных цилиндрах.

Для цитирования: Сиваков В.П., Вураско А.В., Куцубина Н.В. Экспериментальное и теоретическое исследование тепловых потерь в сушильных цилиндрах // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 2. С. 169–179. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-169-179

Ключевые слова: сушильный цилиндр, температура торцевых крышек, диагностирование, теплоемкость, охлаждение, теплоизоляция, тепловые потери, экономия.

Введение

В настоящее время снижению тепловых потерь и энергосбережению в целлюлозно-бумажном производстве (ЦБП) уделяется значительное внимание. Повышение эффективности процессов теплообмена в конденсатном хозяйстве рассмотрено в [1, 2, 4]. Отмечена актуальность проблем совершенствования проектирования и эксплуатации теплообменного оборудования пароконденсатного хозяйства предприятий ЦБП.

Вопросы энергосбережения при производстве бумаги и картона рассматривают как одно из основных направлений при модернизации оборудования [10, 11] в исследованиях [12, 19] и обсуждают на семинарах [13].

Инновационные решения по совершенствованию процессов и оборудования сушки бумаги предложены в работах [7, 8, 13–17, 20, 21], где исследованы и обоснованы новые технологические и технические решения, обеспечивающие сушку бумаги при низких затратах энергии. Отмечено, что к новым технологиям производства ЦБП относят инжиниринговые решения по энергосбережению.

Цель исследования – разработка методов определения тепловых потерь в сушильных цилиндрах при контактной сушке бумажного полотна.

Объекты и методы исследования

Сушильные цилиндры (СЦ) предназначены для контактной сушки бумажного полотна, происходящей только по части боковой поверхности СЦ, охватываемой бумагой. Другая часть боковой поверхности СЦ, не контактирующая с полотном бумаги, а также поверхности торцевых крышек соприкасаются с воздухом и нерационально расходуют тепловую энергию. Тепло, отводимое от торцевых крышек, можно рассматривать как тепловые потери. При определении поверхности СЦ, соприкасающейся с воздухом, поверхность торцевых крышек не учитывают. Предполагают, что они будут защищены теплоизоляцией [3]. На отечественных предприятиях СЦ в бумагоделательных машинах не имеют теплоизоляции торцевых крышек.

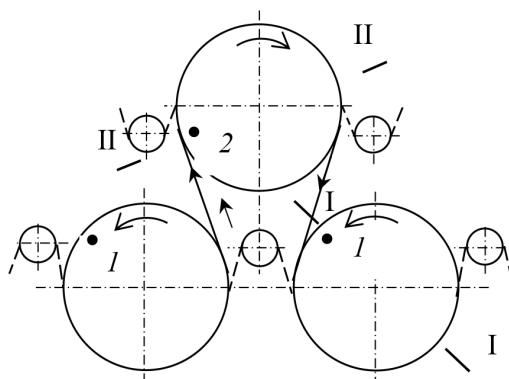
Паро-конденсатная система СЦ большинства бумагоделательных машин представлена групповой системой теплоснабжения. Дроссельные шайбы, выпускающие конденсат и пролетный пар, изготовлены с нерегулируемым условным проходом влаги. При изменении теплового и гидравлического режимов паро-конденсатной системы и скорости бумагоделательной машины дроссельные шайбы не обеспечивают пропорциональную изменившимся условиям подачу пара и удаление конденсата. Это приводит к его накоплению и снижению теплоотдачи от греющего пара к стенке СЦ.

Температуру торцевых крышек СЦ измеряли с лицевой стороны при установившейся рабочей скорости машины. При этом применяли пирометр Tem Pro300 с диапазоном съема показаний от -50 до $+380$ °С. Предварительно поверхности торцевых крышек в местах измерения температуры очищали от загрязнений. Луч пирометра при измерении направляли под прямым углом к поверхности торцевой крышки, расстояние от пирометра до которой – $0,8 \dots 1,0$ м.

Расположение точек измерения температур на поверхности торцевых крышек выбрано по контурным температурным графикам в диаметральном сечении. Установлено, что в нем точки следует размещать в интервале от 90 до 120 мм в направлении от поверхности СЦ к оси вращения. При измерениях такое расположение точек предотвращает искажение данных о температурах, в противном случае на них могли бы повлиять крепежный кольцевой борт крышки и люк в ней. Для обеспечения одинаковых условий измерения по СЦ нижнего и верхнего рядов диаметральные сечения I-I и II-II повернуты от горизонтальной оси так, чтобы точки измерения температур были расположены перед линиями контактов полотна бумаги с СЦ (рис. 1).

Рис. 1. Схема контрольных точек измерения температур торцевых крышек СЦ: 1 и 2 – точки измерения температур нижнего и верхнего рядов; I-I, II-II – расположение точек измерения температур

Fig.1. Scheme of the control points for measuring the temperature of end caps of the drying cylinders: 1, 2 – temperature measuring points of the lower and upper rows; I-I, II-II – location of temperature measurement points



Экспериментально исследована температура у торцевых крышек СЦ № 12–22 и 45–56. Измерения температуры СЦ в группе по пару выполнены при установившемся режиме работы сушильной части за период времени 58...62 мин. Каждый СЦ при последовательном обходе исследован 3 раза. Замеры температуры в каждой точке производили с выдержкой в 2 мин, рассчитывали средние значения и статистически обрабатывали полученные данные – раздельно для каждой из обследованных групп СЦ по пару. При разработке температурного метода определения СЦ с повышенным содержанием конденсата использованы работы [7, 8].

Результаты исследования и их обсуждение

Среднее арифметическое значение температур \bar{t}_k , °С, цилиндров каждой группы по пару определяли по формуле

$$\bar{t}_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i; \quad i=1,2,\dots,n, \quad (1)$$

где k – номер сушильной группы по пару; n – количество СЦ в группе по пару; t_i – температура i -го СЦ.

Среднее квадратичное отклонение температуры:

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

Допустимые уровни температур СЦ:

минимальные

$$T_{k \min} = \bar{t}_k - t_{ck} S_k; \quad (3)$$

максимальные

$$T_{k \max} = \bar{t}_k + t_{ck} S_k, \quad (4)$$

где t_{ck} – табличное значение критерия Стьюдента для k -й сушильной группы по пару [6].

Измеренные уровни температур СЦ, средние арифметические значения \bar{t}_k , средние квадратичные отклонения S_k и допустимые уровни температур $T_{k \min}$, $T_{k \max}$, рассчитанные по формулам (1)–(4), приведены в таблице, графики температур СЦ второй и первой групп по пару показаны на рис. 2.

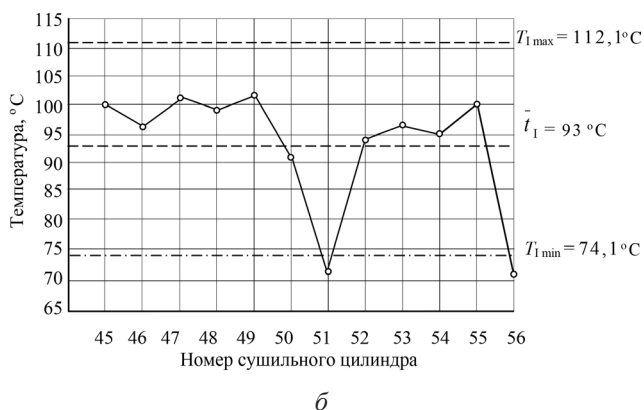
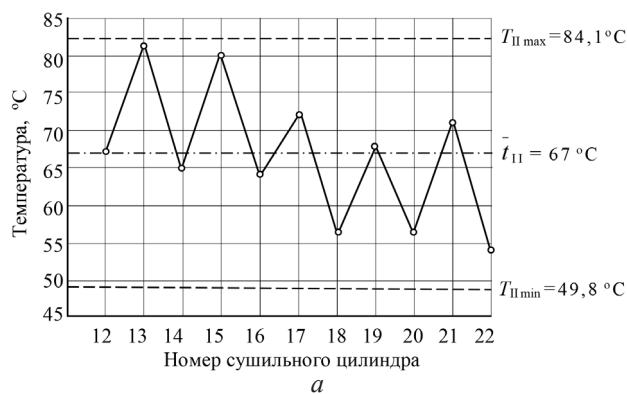


Рис. 2. Графики температур СЦ второй (а) и первой (б) сушильных групп по пару

Fig. 2. Temperature graph of the drying cylinders of the second (a) and the first (b) steam drying groups

**Температура торцевых крышек СЦ второй и первой сушильных групп
по пару с лицевой стороны в рабочем режиме**

Вторая сушильная группа		Первая сушильная группа	
Номер цилиндра	Температура t_{II} , °C	Номер цилиндра	Температура t_I , °C
12	67	45	100
13	83	46	97
14	65	47	101
15	80	48	98
16	64	49	102
17	73	50	91
18	56	51	72
19	68	52	94
20	56	53	97
21	71	54	95
22	54	55	100
		56	71
$\bar{t}_{II} = 67^\circ\text{C}$		$\bar{t}_I = 93^\circ\text{C}$	
$S_{II} = 9,4^\circ\text{C}$		$S_I = 10,6^\circ\text{C}$	
$T_{II\min} = 49,8^\circ\text{C}; T_{II\max} = 84,1^\circ\text{C}$		$T_{I\min} = 74,2^\circ\text{C}; T_{I\max} = 112,1^\circ\text{C}$	

Из рис. 2, а следует, что значения температур поверхности СЦ второй группы не выходят за границы допустимых уровней с преобладанием смещения температур к $T_{II\min}$.

Для цилиндров первой группы по пару (рис. 2, б) характерен более высокий уровень экспериментальных и расчетных характеристик температуры по сравнению со второй группой. Температура поверхности торцевых крышек СЦ № 51 и 56 ниже допустимого уровня $T_{I\min} = 74,2^\circ\text{C}$. Поэтому следует проверить исправность паро-конденсатной системы этих цилиндров при плановом останове бумагоделательной машины.

По минимально-допустимым уровням температур выявлены СЦ с повышенным содержанием конденсата и обоснован ремонт системы отвода этих испарений для снижения тепловых потерь (расхода пара).

В СЦ скоростных бумагоделательных машин конденсат, образующийся при охлаждении пара на внутренней поверхности, подвержен воздействию сил тяжести G и центробежных сил F_{II} [3, 5]. Движение конденсата на внутренней поверхности СЦ под действием этих сил принципиально отличается от его движения по внутренней поверхности торцевых крышек.

От действия сил G и F_{II} на внутренних стенках СЦ происходит образование конденсатных колец, значительно снижающих теплопередачу от греющего пара к стенке СЦ и эффективность контактной сушки бумажного полотна [3, 5].

Частицы конденсата и в целом конденсатная пленка, образующаяся при конденсации пара на внутренней поверхности торцевых крышек, имеют движение от оси вращения к периметру, ограниченному внутренним радиусом СЦ.

Другими словами, конденсат под действием центробежных сил движется с торцевых крышек в радиальном направлении от оси к боковой поверхности СЦ, увеличивая толщину конденсатного кольца и уменьшая толщину конденсатной пленки на внутренней поверхности торцевых крышек.

На внутренней поверхности торцевых крышек из-за хорошего отвода влаги происходит более интенсивная конденсация греющего пара и увеличение температуры поверхности по сравнению с боковой поверхностью СЦ. Тепловой поток от торцевых крышек направлен перпендикулярно от зоны контактной сушки бумаги на станины, стенки теплоизоляционного колпака и в зал, место расположения бумагоделательной машины, т. е. происходит отвод тепла из зоны сушки бумаги.

Установлена одна из причин неравномерной сухости бумажного полотна по ширине. Конденсатное кольцо на внутренней стенке по краям СЦ приобретает утолщение из-за конденсата с торцевых крышек, поступающего от действия центробежных сил. Его выводят из СЦ сифоном с приводной стороны, поэтому на этой стороне конденсатная пленка имеет меньшую толщину, чем с лицевой, на которой при большой толщине конденсатного кольца происходит значительное снижение теплоотдачи от СЦ к бумаге по сравнению с приводной стороной. Это уменьшает температуру на внешней стороне. Бумажное полотно на лицевой стороне СЦ просыхает хуже. Односторонний вывод конденсата и физический эффект центробежного сгона конденсата с торцевых крышек на внутреннюю поверхность СЦ приводят к тому, что бумажное полотно имеет меньшую сухость с лицевой стороны бумаги. У многих бумагоделательных машин для выравнивания сухости полотна по ширине используют устройства дополнительной сушки с лицевой стороны. Применение теплоизоляции торцевых крышек будет способствовать равномерной сухости по ширине бумажного полотна.

Рассчитаем экономию греющего пара, расходуемого на сушку полотна бумаги, при установке теплоизоляции торцевых крышек для СЦ диаметром $D = 1,5$ м, длиной $L = 6,8$ м, толщиной стенок цилиндра и торцевой крышки $\delta = 0,03$ м (производительность машины 7000 кг/ч абсолютно сухой бумаги).

Площадь боковой поверхности СЦ:

$$F_6 = \pi DL = 3,14 \cdot 1,5 \cdot 6,8 = 32 \text{ м}^2.$$

Площадь боковой поверхности СЦ, соприкасающейся с воздухом:

$$F_{6.в} = \frac{1-\beta}{\beta} F_6 = \frac{1-0,65}{0,65} \cdot 32 = 17,2 \text{ м}^2,$$

где β – средний коэффициент использования боковой поверхности СЦ.

Площадь поверхности торцевых крышек СЦ, соприкасающейся с воздухом:

$$F_k = z \frac{\pi D^2}{4} = 2 \cdot \frac{3,14 \cdot 1,5^2}{4} = 3,53 \text{ м}^2,$$

где z – количество торцевых крышек.

Площадь общей поверхности СЦ, соприкасающейся с воздухом:

$$F_{ц.о} = F_{6.в} + F_k = 17,20 + 3,53 = 20,73 \text{ м}^2.$$

Коэффициент теплопередачи поверхности торцевых крышек можно снизить за счет их теплоизоляции. Например, при теплоизоляции минеральной ватой коэффициент теплопередачи k уменьшается в 4 раза [9]. Снижение

тепловых потерь при теплоизоляции торцевых крышек СЦ пропорционально сокращению поверхности контакта с воздухом нетеплоизолированных торцевых крышек.

Площадь пропорциональной поверхности теплопередачи торцевых крышек после теплоизоляции:

$$F_{к.т} = z \frac{\pi D^2}{4} \frac{1}{k} = 2 \cdot \frac{3,14 \cdot 1,5^2}{4} \cdot \frac{1}{4} = 0,88 \text{ м}^2,$$

где k – коэффициент теплопередачи.

Площадь поверхности теплопередачи СЦ, соприкасающейся с воздухом, после теплоизоляции торцевых крышек:

$$F_T = F_{6,в} + F_{к.т} = 17,20 + 0,88 = 18,08 \text{ м}^2.$$

Площадь поверхности теплопередачи от СЦ в воздух после установки теплоизоляции торцевых крышек эквивалентно сокращается на

$$\Delta F_{ц.о} = \frac{F_{ц.о} - F_T}{F_{ц.о}} \cdot 100 = \frac{20,73 - 18,08}{20,73} \cdot 100 = 12,78 \text{ \%}.$$

Влажосодержание воздуха на входе в сушильную часть:

$$X_1 = \chi \frac{\varphi_1 P_{н1}/10^5}{1 - \varphi_1 P_{н1}/10^5} = 0,622 \cdot \frac{0,4 \cdot 1250/10^5}{1 - 0,4 \cdot 1250/10^5} = 0,003 \text{ кг/кг},$$

где χ – отношение газовых постоянных воздуха R_L и пара R при $R_L = 287$, $R = 462$ [3], $\chi = R_L/R = 287/462 = 0,622$; $P_{н1}$ – давление насыщенного пара при начальной влажности воздуха $\varphi_1 = 0,4$ [3], Па.

Влажосодержание воздуха на выходе из сушильной части:

$$X_2 = \chi \frac{\varphi_2 P_{н2}/10^5}{1 - \varphi_2 P_{н2}/10^5} = 0,622 \cdot \frac{0,84 \cdot 2500/10^5}{1 - 0,84 \cdot 2500/10^5} = 0,165 \text{ кг/кг},$$

где $P_{н2}$ – давление насыщенного пара при конечной влажности воздуха $\varphi_2 = 0,84$ [3], Па.

Количество влаги, вносимой с бумагой в сушильную часть:

$$W_1 = \frac{\omega_1}{100 - \omega_1} \Pi = \frac{70}{100 - 70} \cdot 7000 = 16\,330 \text{ кг/ч},$$

где ω_1 – начальная влажность бумаги на входе в сушильную часть, %; Π – производительность бумагоделательной машины, кг/ч.

Количество влаги, остающейся в бумаге:

$$W_2 = \frac{\omega_2}{100 - \omega_2} \Pi = \frac{7}{100 - 7} \cdot 7000 = 526,9 \text{ кг/ч},$$

где ω_2 – конечная влажность бумаги на выходе из сушильной части, %;

Количество подаваемого в сушильную часть воздуха:

$$L = \frac{W_1 - W_2}{X_2 - X_1} = \frac{16\,330 - 527}{0,165 - 0,003} = 97\,550 \text{ кг/ч}.$$

Коэффициент теплопередачи через поверхность СЦ, соприкасающуюся с воздухом:

$$k_b = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2} = \frac{1}{1/6250 + 0,03/165 + 1/40} = 39,46 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}},$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи греющего пара к стенке цилиндра, кДж/м²·ч·град; δ – толщина стенки СЦ, м; λ – теплопроводность металла стенок

СЦ и торцевой крышки, $\text{кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$ α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки СЦ к воздуху, $\text{кДж}/\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}$.

Теплоемкость воздуха:

$$C = C_1 + C_2 X_1 = 1 + 1,92 \cdot 0,003 = 1,01 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}},$$

где C_1 – теплоемкость воздуха [3], $\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{град}$; C_2 – теплоемкость водяного пара [3], $\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{град}$.

Температура воздуха, подаваемого в сушильную часть:

$$t_1 = \frac{CLt_2 - k_b n F_{\text{ц.о}} \left(t_{\text{п}} - \frac{t_2}{2} \right) \eta}{CL - k_b n F_{\text{ц.о}} \frac{\eta}{2}} = \frac{1,01 \cdot 67 \cdot 247 \cdot 60 - 39,46 \cdot 56 \cdot 20,73 \cdot \left(133 - \frac{60}{2} \right) \cdot 0,7}{1,01 \cdot 67 \cdot 247 - 39,46 \cdot 56 \cdot 20,73 \cdot \frac{0,7}{2}} \approx 32 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где t_2 – конечная температура воздуха для сушки [3], $^\circ\text{C}$; $t_{\text{п}}$ – температура греющего пара [3], $^\circ\text{C}$; η – коэффициент использования тепла, отданного воздуху [3].

Определим тепловые потери СЦ через торцевые крышки.

Количество теплоты, передаваемое воздуху через торцевые крышки СЦ всей сушильной части без теплоизоляции:

$$Q_1 = n k_b F_{\text{к}} \left(t_{\text{п}} - \frac{t_1 + t_2}{2} \right) = 56 \cdot 39,46 \cdot 3,53 \cdot \left(130 - \frac{32 + 60}{2} \right) = 652 \, 113 \text{ кДж/ч.}$$

Количество теплоты, передаваемое воздуху через торцевые крышки СЦ всей сушильной части с теплоизоляцией:

$$Q_{1\text{T}} = n k_b F_{\text{к.т}} \left(t_{\text{п}} - \frac{t_1 + t_2}{2} \right) = 56 \cdot 39,46 \cdot 0,88 \cdot \left(130 - \frac{32 + 60}{2} \right) = 162 \, 567 \text{ кДж/ч.}$$

Часовая экономия тепла в сушильной части, передаваемого через торцевые крышки СЦ воздуху:

$$\Delta Q = Q_1 - Q_{1\text{T}} = 652 \, 113 - 162 \, 567 = 489 \, 545 \text{ кДж/ч.}$$

Часовая экономия греющего пара в сушильной части при теплоизоляции торцевых крышек СЦ:

$$D = \frac{\Delta Q}{I - C_w t_{\text{к}}} = \frac{489 \, 545}{2750 - 4,17 \cdot 133} = 223 \text{ кг/ч,}$$

где I – теплосодержание греющего пара при температуре конденсата $t_{\text{к}}$, $\text{кДж}/\text{кг}$; C_w – теплоемкость испаряемой воды [3], $\text{кДж}/\text{кг} \cdot \text{град}$; $t_{\text{к}}$ – температура конденсата [3], $^\circ\text{C}$.

Отметим, что тепловой поток от торцевых крышек СЦ направлен в основном на станины сушильной части и в зал, где расположена бумагоделательная машина. Теплоизоляция торцевых крышек СЦ, наряду с экономией пара, способствует созданию более комфортных температурных условий для обслуживающего персонала.

Выводы

1. В ходе экспериментального исследования температуры сушильных цилиндров выявлены два из них с повышенным содержанием конденсата. Метод статистической обработки температур сушильного цилиндра обеспечивает достоверную вероятность в 90 % обнаружения сушильного цилиндра с повы-

шенным содержанием конденсата. Метод можно применять при диагностировании работоспособного технического состояния систем удаления конденсата из сушильных цилиндров.

2. Метод определения тепловых потерь через торцевые крышки сушильных цилиндров апробирован при исследовании тепловых процессов бумагоделательной машины производительностью 7000 кг/ч по абсолютно сухой бумаге. Показано, что теплоизоляция торцевых крышек сушильных цилиндров значительно снижает расход пара (до 223 кг/ч) при контактной сушке бумаги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Бельский А.П. Проектирование и расчет теплообменных (сушильных) установок. Л.: ЛТА, 1992. 115 с. [Bel'skiy A.P. *Design and Calculation of Heat Exchange (Drying) Plants*. Leningrad, LTA Publ., 1992. 115 p.]

2. Бельский А.П., Лотвинов М.Д. Вентиляция бумагоделательных машин. М.: Лесн. пром-сть, 1990. 215 с. [Bel'skiy A.P., Lotvinov M.D. *Ventilation of Paper Machines*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990. 215 p.]

3. Бушмелев В.А., Вольман Н.С. Процессы и аппараты целлюлозно-бумажного производства. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 352 с. [Bushmelev V.A., Vol'man N.S. *Processes and Apparatus for Pulp and Paper Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1969. 352 p.]

4. Ершов Ю.Г., Санников В.А. Конденсатное хозяйство целлюлозно-бумажных предприятий. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 263 с. [Ershov Yu.G., Sannikov V.A. *Condensate Economy of Pulp and Paper Mills*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 263 p.]

5. Куров В.С., Кокушин Н.Н. Теория и конструкция машин и оборудования отрасли. Бумаго- и картоноделательные машины. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 588 с. [Kurov V.S., Kokushin N.N. *Theory and Design of Machinery and Equipment of the Industry. Paper and Board Machines*. Saint Petersburg, Polytech Publ., 2006. 588 p.]

6. Сиваков В.П., Вураско А.В., Леонович А.А. Основы научных исследований в химической и химико-механической переработке растительного сырья. Екатеринбург: УГЛТУ, 2010. 137 с. [Sivakov V.P., Vurasko A.V., Leonovich A.A. *Fundamentals of Scientific Research in Chemical and Chemical-Mechanical Processing of Plant Raw Materials*. Yekaterinburg, USFEU Publ., 2010. 137 p.]

7. Сиваков В.П., Степанова Е.Н., Вураско А.А., Стоянов О.В. Кластерное диагностирование при комплексной оценке работоспособного состояния технического оборудования // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2015. Т. 18, № 1. С. 357–358. [Sivakov V.P., Stepanova E.N., Vurasko A.A., Stoyanov O.V. Cluster Diagnosis in a Comprehensive Assessment of the Serviceability of Technical Equipment. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2015, vol. 18, no. 1, pp. 357–358].

8. Сиваков В.П., Микушина В.Н., Вураско А.В., Стоянов О.В., Гребенищikov Ю.М. Применение трендового анализа при диагностировании технического состояния оборудования // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2015. Т. 18, № 2. С. 390–392. [Sivakov V.P., Mikushina V.N., Vurasko A.V., Stoyanov O.V., Grebenshikov Y.M. Application of Trend Analysis for Diagnosing the Technical State of Equipment. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University], 2015, vol. 18, no. 2, pp. 390–392].

9. Тордуа Г.А. Машины и аппараты целлюлозно-бумажного производства. М.: Лесн. пром-сть, 1986. 440 с. [Tordua G.A. *Machines and Apparatus for Pulp and Paper Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1986. 440 p.]

10. APPM to Revamp Pulp at Novodvinsk Mill. *PPI Europe*, 2014, vol. 29, no. 12, p. 11.

11. Dumas: Customized Steam and Condensate System for Palm Wörth PM 6. *Prof. Papermark*, 2004, no. 1, pp. 67–68.
12. Hazi A., Hazi G. Exergy Flows in the Paper Machine. *Modelling and Optimization in the Machines Building Field*, 2005, no. 11, vol. III, pp. 146–149.
13. *International Conference Voith Paper – Graphic Papers, September 4–6, 2002*. Salzburg, 2002, pp. 23–24.
14. Jewitt D.E. *Apparatus and Associated Method for Drying a Wet Web of Paper*. Patent US, no. 6425981, 2002.
15. Mayer R., Begemann U. *Anordnung zur Herstellung oder/und Behandlung von Bahn- oder Blattmaterial* [Device for the Production and/or Treatment of Strip or Sheet Material]. Patent DE, no. WO 2005/045130 A2, 2005.
16. Metso Paper: Inbetriebnahme der weltgrößten Wellpappenrohpapermaschine. *Allgemeine Papier-Rundschau*, 2003, pp. 16–21.
17. Sautter G.M. The Drying and Fining Processes Future Innovation Solutions for Efficiency, Quality and Safety. *Pulp and Paper Industry*, 2017, vol. 2/3, pp. 30–35.
18. Sekiya K. *Pollution Prevention Method for Cylindrical Dryer Used in Paper Machine*. Patent US, no. US 6,858,113 B1, 2005.
19. Steam System and Dryer Services. *Pulp and Paper Industry*, 2010, vol. 52, no. 8, p. 11.
20. Viljanmaa M. *Method and Equipment for Producing Driving Power in Paper or Board Mill*. Patent US, no. US 2005/0160618 A1, 2005.
21. Wolf R., Mack T., Oechsle M., Mayer W. *Verfahren und Anordnung zum Trocknen einer Faserstoffbahn insbesondere Papier-, Karton- oder Tissuerbahn*. Patent DE no. DE 19958875 A1, 2001.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF HEAT LOSSES IN DRYING CYLINDERS

Valeriy P. Sivakov, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-6084-2021](https://orcid.org/0000-0002-9387-1512),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9387-1512>

Alesya V. Vurasko, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [AAC-5594-2021](https://orcid.org/0000-0002-9471-085X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9471-085X>

Nelli V. Kutsubina, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-4846-2021](https://orcid.org/0000-0002-0438-406X),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0438-406X>

Ural State Forest Engineering University, ul. Sibirskiy trakt, 37, Yekaterinburg, 620100, Russian Federation; e-mail: vurasko2010@yandex.ru, sivakov.VP@usfeu.ru, Nelly3416@mail.ru

Abstract. The research purpose is to develop methods for determination of heat losses in drying cylinders. Experimental study of temperature of drying cylinders performed in the drying section of a paper machine during its steady-state operation. Medium, maximum and permissible statistical characteristics of drying cylinder temperatures were defined. The drying cylinders with increased condensation concentration were determined by the minimally permissible temperature levels and the repair of the condensation drainage system to reduce heat losses (steam consumption) was justified. The cause of uneven dryness of the paper web across the width has been determined. The condensate ring on the inner wall at the edges of the drying cylinders gets thickened due to moisture coming from the end caps from the action of centrifugal forces. The condensation is removed from the drying cylinders with a siphon on the drive side. Therefore, on the front side of the drying cylinders condensate film has a greater thickness, and the paper web dries worse. The single-sided condensate disposal and the physical effect of centrifugal condensate runoff from the end caps to the side inner surface

of the drying cylinders cause a lower dryness from the front side of the paper web. The use of thermal insulation of end caps will contribute to uniform dryness across the width of the paper web. The results of experimental studies were processed by methods of mathematical statistics in order to describe the thermal losses during contact drying of the paper web on drying cylinders with and without thermal insulation of the end caps to the ambient air. The calculation of heat losses is carried out according to the refined method of researching thermal processes in contact drying of paper web. It is found, that the use of thermal insulation of the end caps of the drying cylinders provides a reduction in steam consumption for contact drying of the paper web without affecting the technological process. The research results can be used to reduce heat losses in the drying section of paper machines on cylinders that do not have thermal insulation of the end caps. For instance, for a paper machine consisting of 56 cylinders with a diameter of 1500 mm and a capacity of 7000 kg/h of absolutely dry paper, insulating their end caps saves up to 223 kg/h of steam for drying the paper web. Methods of detection of drying cylinders with increased content of condensation on permissible levels of temperature is developed and approved. A refined method for determining thermal losses during contact drying of the paper web on drying cylinders has been developed.

For citation: Sivakov V.P., Vurasko A.V., Kutsubina N.V. Experimental and Theoretical Study of Heat Losses in Drying Cylinders. *Lesnoy Zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 2, pp. 169–179. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-2-169-179

Keywords: drying cylinder, temperature of end cups, diagnosis, heat capacity, cooling, thermal insulation, heat losses, saving.

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
The authors declare that there is no conflict of interest*

Поступила 12.02.20 / Received on February 12, 2020
