

УДК 676.012

Л.М. Бойков¹, Н.С. Нечаев²

¹Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров

²Фирма «Спиракс-Сарко инжиниринг»

Бойков Лев Михайлович родился в 1938 г., окончил в 1961 г. Ленинградский технологический институт целлюлозно-бумажной промышленности, доктор технических наук, профессор кафедры промышленной теплоэнергетики СПбГТУРП. Имеет более 120 трудов в области промышленной теплоэнергетики в целлюлозно-бумажном производстве.

E-mail: lev-boykov@mail.ru

Нечаев Николай Сергеевич родился в 1969 г., окончил в 1991 г. Военный инженерно-космический институт им. А.Ф. Можайского, руководитель направления в фирме «Спиракс-Сарко инжиниринг». Имеет около 20 печатных работ в области промышленной теплоэнергетики в целлюлозно-бумажном производстве.



ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНЫХ И КАРТОНДЕЛАТЕЛЬНЫХ МАШИН

Приведены основные показатели эффективности работы сушильных установок бумаго- и картоноделательных машин (БДМ и КДМ). Сформулированы причины снижения производительности и перерасхода теплоты в процессе сушки бумаги и картона на действующих БДМ и КДМ. Предложены пути повышения эффективности их работы.

Ключевые слова: эффективность сушки, сушильные установки, бумагоделательные машины, картоноделательные машины, пароконденсатная система, производительность машины, удельный расход теплоты на сушку бумаги или картона, интенсивность сушки.

В настоящее время при расчете современных контактных сушильных установок широко используется методика определения зависимости производительности бумаго- и картоноделательных машин (БДМ и КДМ) от активной поверхности сушильных цилиндров [2, 7–9].

Повышение эффективности работы сушильной части БДМ и КДМ во многом определяется тепловым расчетом контактно-конвективных сушильных установок.

Рассмотрим приближенное уравнение теплопередачи при контактной сушке с учетом нестационарности процесса:

для периода прогрева полотна
$$q_1 = K(t_{н.п} - t_{пр});$$

для первого периода сушки
$$q_1 = K(t_{н.п} - t_{п1});$$

© Бойков Л.М., Нечаев Н.С., 2012

для второго периода сушки

$$q_2 = q_1 Z m_r,$$

где q – удельный тепловой поток на активной поверхности цилиндров;

K – приведенный коэффициент теплопередачи;

$t_{н.п}$ – температура насыщенного пара при данном давлении;

$t_{пр}$ – средняя температура полотна в период прогрева;

$t_{п1}$ – температура полотна в первом периоде сушки;

Z – среднеинтегральный коэффициент сушки;

m_r – коэффициент, учитывающий относительную теплоту прогрева во втором периоде сушки.

Приведенный коэффициент теплопередачи

$$K = \frac{1-a}{\varphi_{ц}} \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta_c / \lambda_c + (1-a) / (\varphi_{ц} \alpha_2)},$$

где a – доля теплоты, отданной боковой поверхностью цилиндра воздуху;

$\varphi_{ц}$ – доля обхвата цилиндра полотном;

α_1 – коэффициент теплообмена при конденсации пара на внутренней поверхности цилиндра;

δ_c, λ_c – толщина и коэффициент теплопроводности стенки цилиндра;

α_2 – коэффициент контактного теплообмена между нагретой стенкой цилиндра и влажным полотном.

Среднеинтегральный коэффициент сушки рассчитывается по уравнению [7–9]

$$Z = \frac{(U_k - U_2)(1-m)}{U_k - U_k^m U_2^{1-m}},$$

где U_k – критическое влагосодержание высушиваемого материала;

U_2 – конечное влагосодержание полотна;

m – показатель степени, установленный опытным путем.

Исследования [2, 5–9] показали, что максимальные значения коэффициента теплообмена α_1 при конденсации пара в цилиндрах тихо- и среднеходных машин находятся в пределах 3500...4000 Вт/(м²·°С), быстроходных (при скорости > 400 м/мин) – 2500...3500 Вт/(м²·°С). Коэффициент контактного теплообмена α_2 зависит от прижатия полотна к поверхности цилиндра и составляет 400...600 Вт/(м²·°С).

Средний расход пара в одном цилиндре группы прогрева ($d_{нп}^{P_3}$, кг/ч) вычисляется по уравнению

$$d_{нп}^{P_3} = \frac{K(t_{н.п}^{P_3} - t_{пр})h_{а.ц}}{(i_n^{P_3} - i_{кнА}^{P_3})\eta_3},$$

где $h_{а.ц}$ – активная поверхность цилиндра;

$i_n^{P_3}, i_{кнА}^{P_3}$ – энтальпия пара и конденсата при давлении P_3 ;

η_3 – коэффициент сохранения теплоты в группе цилиндров.

Активная поверхность цилиндра определяется из уравнения

$$h_{a.ц} = \pi D_{ц} b_{п} \varphi_{ц},$$

где $D_{ц}$ – диаметр цилиндра;

$b_{п}$ – ширина полотна.

Расход пара в одном цилиндре первого периода во второй паровой группе находится из уравнения

$$d_1^{P_2} = \frac{K(t_{н.п}^{P_2} - t_1)h_{a.ц}}{(i_{п}^{P_2} - i_{кнА}^{P_2})\eta_2},$$

Расход пара в цилиндрах второго периода сушки определяется отдельно для каждого цилиндра в первой паровой группе:

$$d_2^{P_1} = \frac{K(t_{н.п}^{P_1} - t_1)h_{a.ц} m_r Z_i}{(i_{п}^{P_1} - i_{кнА}^{P_1})\eta_1},$$

Результаты расчетов расходов пара сводятся в таблицу. На основании полученных данных определяется расход пара на каждую паровую группу цилиндров, сушильную установку и удельные расходы пара и теплоты на сушку полотна.

При развитых процессах кипения и испарения во влажных слоях материала суммарный массовый поток влаги определяется уравнением (индекс ж – жидкость, п – пар):

$$J_m = J_{ж} + J_{п} = -a_{ж} (\rho_c \partial U / \partial x + \delta \rho_c \partial t / \partial x + \delta_{п} \partial P / \partial x),$$

где $a_{ж}$ – коэффициент влагопроводности полотна;

ρ_c – плотность абс. сухого материала;

δ – коэффициент термовлагопроводности;

$\delta_{п}$ – относительный коэффициент фильтрации, $\delta_{п} = K_{п} / a_{ж}$;

$K_{п}$ – коэффициент фильтрации.

При прогреве уравнение теплового баланса и теплообмена во время пребывания бумажного полотна на сушильном цилиндре имеет следующий вид [1–12]:

$$dq_{к.т} = \alpha_{к.т} (t_{гр} - t_6) d\tau_{ц} = (C_{с.п} + U_0 C_w) P_{с.п} dt_6,$$

где $\alpha_{к.т}$ – коэффициент контактного теплообмена;

$t_6, t_{гр}$ – температуры соответственно бумажного полотна и греющей поверхности цилиндра;

$\tau_{ц}$ – продолжительность пребывания бумажного полотна на цилиндре;

$C_{с.п}$ – теплоемкость сухого полотна;

U_0 – начальное влагосодержание бумажного полотна;

C_w – теплоемкость воды;

$P_{с.п}$ – поверхностная плотность сухой массы материала.

После интегрирования этого уравнения можно определить температуру бумажного полотна при сходе с цилиндра.

Как показали эксперименты [1–12], на участках межцилиндрового пробега полотна испарение влаги происходит в основном за счет теплоты, аккумулированной влажным полотном в период его контакта с греющей поверхностью. При этом температура полотна значительно снижается, но при соприкосновении с последующим цилиндром вновь повышается до температуры насыщения. Интенсивность испарения влаги на участках свободного пробега полотна является функцией нескольких переменных параметров: скорости движения полотна, начальной и конечной температур материала на данном участке, парциальных давлений водяного пара на поверхности материала $P_{\text{п}}$ и в воздухе $P_{\text{в}}$.

Анализ тепломассообмена на межцилиндровом пробеге полотна основан на совместном решении уравнений баланса теплоты и массообмена:

$$\begin{aligned} dq_{\text{б}} &= m r dt = \varphi_{\text{к}}(C_{\text{с.п}} + C_{\text{в}} U) P_{\text{с.п}} dt_{\text{п}}; \\ m &= 2 \beta_{\text{р}} (P_{\text{п}} - P_{\text{в}}), \end{aligned}$$

где m – интенсивность сушки;
 $\varphi_{\text{к}}$ – коэффициент, учитывающий теплоотдачу полотна в окружающую среду;
 $C_{\text{с.п}}, C_{\text{в}}$ – теплоемкость сухого материала и влаги;
 U – среднее влагосодержание материала на участке;
 $\beta_{\text{р}}$ – коэффициент массообмена, отнесенный к разности парциальных давлений на поверхности влажного материала и в воздухе.

Подставив одно уравнение в другое, получим уравнение баланса теплоты

$$m r dt = 2\beta_{\text{р}} (P_{\text{п}} - P_{\text{в}}) r dt = \varphi_{\text{к}} (C_{\text{с.п}} + C_{\text{в}}U) P_{\text{с.п}} dt_{\text{п}}.$$

Решение данного уравнения [1–4, 10–12] позволяет определить зависимость температуры полотна от продолжительности его пребывания в воздушной среде для первого и второго периодов сушки.

К основным показателям эффективности работы сушильных установок БДМ и КДМ относятся следующие: удельный расход теплоты и пара на единицу вырабатываемой продукции и на единицу испаряемой из полотна влаги; удельный расход воздуха на 1 т бумаги или картона. Важным показателем является также производительность машины, которая зависит от интенсивности сушки полотна и удельного влагосъема.

В работах [1–12] представлена методика теплового расчета сушильных установок БДМ и КДМ. В соответствии с этой методикой производительность сушильной установки ($G_{\text{м}}$, кг/ч) рассчитывается по уравнению

$$G_{\text{м}} = 60W_{\text{м}}b_{\text{п}}P_{\text{с.п}},$$

где $W_{\text{м}}$ – скорость движения полотна, м/мин;
 $b_{\text{п}}$ – обрезная ширина полотна, м.

В зависимости от производительности установки определяется количество передаваемой полотну теплоты (Q , кДж/ч) по периодам сушки:

для периода прогрева полотна

$$Q_{\text{пр}} = (1/\psi_{\text{пр}})G_{\text{м}}(C_{\text{с.п}} + C_{\text{в}}U_0) (t_1 - t_0);$$

для первого периода сушки

$$Q_1 = (1/\psi_1) G_{\text{м}}(U_0 - U_{\text{к1}}) r_1;$$

для второго периода сушки

$$Q_2 = (1/\psi_2) G_{\text{м}}(U_{\text{к1}} - U_2) (r_2 + \Delta q_{\text{м}}),$$

где $\psi_{\text{пр}}$, ψ_1 , ψ_2 – коэффициенты использования тепла в отдельные периоды сушки;

r_1 , r_2 – теплота парообразования в первом и втором периодах сушки;

$\Delta q_{\text{м}}$ – удельная теплота прогрева полотна при конечном влагосодержании U_2 , отнесенная к 1 кг испаряемой влаги,

$$\Delta q_{\text{м}} = (C_{\text{с.п}} + C_{\text{в}}U_2) (t_2 - t_1)/(U_{\text{к1}} - U_2).$$

Суммарный расход тепла на сушку

$$Q_{\text{с}} = Q_{\text{пр}} + Q_1 + Q_2.$$

Расход пара на сушку

$$D_{\text{с}} = \left(\frac{Q_{\text{пр}}}{\eta_{\text{пр}}} + \frac{Q_1}{\eta_1} + \frac{Q_2}{\eta_2} \right) \left(\frac{1}{i_{\text{п}} - i_{\text{к}}} \right)$$

где $\eta_{\text{пр}}$, η_1 , η_2 – коэффициенты сохранения теплоты в группах цилиндров;
 $i_{\text{п}}$, $i_{\text{к}}$ – энтальпия пара на входе в сушильную часть машины и энтальпия конденсата на выходе из установки.

Теоретические или расчетные удельные расходы на выработку 1 т бумаги или картона:

тепла, ГДж/т,

$$q_6^{\text{т}} = \frac{Q_{\text{с}}}{G_{\text{м}}};$$

пара, т/т,

$$d_6^{\text{т}} = \frac{D_{\text{с}}}{G_{\text{м}}}.$$

Количество влаги, испаряемой из влажного полотна, кг/ч,

$$M = G_{\text{м}}^{\text{ac}} (U_0 - U_2).$$

Интенсивность сушки бумаги (картона), или удельный влагоъем с 1 м² полотна, кг/ (м²·ч),

$$m = \frac{M}{n_{ц} h_{ац}} .$$

Удельные расходы на 1 т испаряемой влаги: теплоты, ГДж/т,

$$q_{в.л}^m = \frac{Q_c}{M} ;$$

пара, т/т,

$$d_{в.л}^m = \frac{D_c}{M} .$$

Расход воздуха на сушку, кг/ч,

$$L_c = \frac{M}{d_5 - d_2} ,$$

где d_5 , d_2 – влагосодержание воздуха на выходе из сушильной установки и на входе.

Удельный расход воздуха на сушку 1 кг бумаги (картона), кг/кг,

$$l_v = \frac{L_c}{G_m} .$$

Коэффициент полезного действия процесса сушки с учетом возврата конденсата

$$\eta_c = \frac{M(i_n^{в.м} - C_w t_{п.о})}{D(i_n^p - i_k)} .$$

На основании многочисленных расчетов сушильных установок БДМ и КДМ, работающих на производствах, теоретические удельные расходы теплоты и пара составляют:

для бумаги или картона

$$q_6^m = 1,0 \dots 1,2 \text{ Гкал/т бумаги}; \quad d_6^m = 2,0 \dots 2,4 \text{ т пара /т бумаги};$$

для целлюлозы

$$q_ц^m = 0,8 \dots 1,0 \text{ Гкал/т целлюлозы}; \quad d_ц^m = 1,6 \dots 1,9 \text{ т пара /т целлюлозы}.$$

На действующих машинах фактические затраты теплоты и пара превышают теоретические на 30...60 %, что обусловлено следующими причинами:

- использование на ряде машин параллельной схемы теплоснабжения;
- разбивка цилиндров по паровым группам не соответствует закономерностям сушки;
- расход пара на сушильные цилиндры не соответствует расчетному значению;

большое количество пролетного пара, который часто используется для транспортировки конденсата от машины к баку-сборнику;
нестабильность теплового и гидравлического режимов работы сушильных установок;
низкие значения начальной сухости полотна перед сушильной установкой;
неудовлетворительный температурный график работы сушильных цилиндров;
несоблюдение закономерностей сушки и форм связи влаги с материалом;
отсутствие системы контроля и управления сушильным процессом, низкий удельный влагосъем;
низкое качество выпускаемой продукции;
не используются новые запатентованные разработки;
частые обрывы полотна;
неудовлетворительный профиль влажности по ширине полотна, кромки полотна после сушки остаются влажными по сравнению с основной шириной полотна;
периодически меняется ассортимент выпускаемой продукции;
низкие значения давления пара по паровым группам и малые перепады давления между группами;
неудовлетворительная работа системы вентиляции БКДМ;
схемы пароконденсатных систем БДМ и КДМ не соответствуют современному уровню развития сушильной техники.

Эти же причины приводят к снижению как производительности машин, так и интенсивности сушки бумаги и картона. Интенсивность сушки (удельный влагосъем) на работающих сушильных установках, как правило, составляет 9...15 кг влаги/ (м²·ч), в то время как на современных БДМ и КДМ после реконструкции пароконденсатных систем она находится в пределах от 20 до 32 кг влаги/ (м²·ч).

Для снижения удельных затрат на сушку и повышение производительности сушильных БДМ и КДМ необходимо разработать и внедрить в производство пароконденсатные системы сушильных установок БДМ и КДМ с минимальными затратами теплоты, максимальной производительностью при минимальных капитальных вложениях денежных средств и малом сроке коммерческой окупаемости (3...6 мес.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тепломассообмен при сушке бумаги на многоцилиндровых установках / А.П. Бельский, В.Ю. Лакомкин, Е.Н. Громова, Е.А. Мурзич // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвуз. сб. науч. тр. / СПбГТУРП. СПб., 2007. 2001. С. 36 – 44.

2. *Бельский А.П.* Теоретические основы процессов контактно-конвективной сушки бумаги: автореф. ... д-ра техн. наук. Л., 1991. 30 с.
3. *Бойков Л.М.* Интенсификация сушки картона // Химия и технология бумаги: межвуз. сб. науч. тр. /ЛТА. Л.,1988. С.127 – 130.
4. *Бойков Л.М.* Оценка эффективности сушки при различных способах энергоподвода // Инж.-физ. журн. 1991. Т. 60, № 3. С. 442–448.
5. *Бойков Л.М.* Совершенствование процессов контактно-конвективной сушки картона и бумаги: автореф. ... д-ра техн. наук. СПб., 2001. 32 с.
6. *Бойков Л.М.* Универсальная методика расчета контактных сушильных установок // Химия и технология целлюлозы и полуцеллюлозы: межвуз. сб. науч. тр. / ЛТА. Л., 1989. С. 28–32.
7. *Жучков П.А.* Исследование эффективности различных методов интенсификации тепловых процессов в сушильных установках для сушки тонких и дисперсных материалов в целлюлозно-бумажном производстве: автореф. ... д-ра техн. наук. М., 1970. 62 с.
8. *Жучков П.А., Саунин В.И.* Тепловой и гидравлический режимы бумагоделательных и картоноделательных машин. М.: Лесн. пром-сть, 1972. 152 с.
9. *Жучков П.А.* Тепловые процессы в целлюлозно-бумажном производстве. М.: Лесн. пром-сть, 1978. 407 с.
10. *Смирнова О.С., Бельский А.П., Лакомкин В.Ю.* Расчет температуры бумажного полотна при кондуктивно-конвективной сушке. Ч. I // Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: межвуз. сб. науч. тр. / СПбГТУРП. СПб., 2005. С. 14 – 20.
11. *Смирнова О.С., Бельский А.П., Лакомкин В.Ю.* То же. Ч. II // Там же. С. 21 – 23.
12. *Тимофеев О.Н.* Влияние конвективного теплообмена и прижимного материала на эффективность контактной сушки бумаги: автореф. ... канд. техн. наук. Л., 1987. 17 с.

Поступила 15.06.11

L.M. Boykov¹, N.S. Nechayev²

¹ St. Petersburg State Technological University of Plant Polymers

² Firm“Spirax-Sarko Engineering”

The Drying Units of Paper- and Cardboard Machines Performance Indicators

The basic performance indicators of paper machines and cardboard machines drying units are presented in the article. Reasons of acting machines manufacturing capacity decrease and heat energy excessive consumption are described. The objective and tasks of paper- and cardboard machines performance increasing are outlined.

Key words: drying productivity, drying units, paper machines, cardboard machines, steam condensing system, productivity of a machine, heat specific consumption for paper or cardboard drying, drying rate.