

## ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ

УДК 676.27.026.5

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС  
В ПРОЦЕССАХ КОНТАКТНОЙ СУШКИ КАРТОНА

А. П. БЕЛЬСКИЙ, В. Ю. ЛАКОМКИН

Ленинградский технологический институт ЦБП

Сушка капиллярно-пористых коллоидных материалов является не только теплофизическим, но и технологическим процессом, при протекании которого изменяются физико-механические свойства материала. Так, неоправданная интенсификация процесса сушки приводит к ухудшению качественных показателей материала (коробление, расслаивание и др.). Причина ухудшения свойств готового изделия — развитие объемно-напряженного состояния высушиваемого материала свыше предельно допустимого, обусловленного реологическими свойствами материала [4], а основная причина развития объемно-напряженного состояния влажного тела при его сушке — неравномерное распределение влагосодержания и температуры по толщине. Поэтому для оптимизации процесса сушки необходимо знать перепады влагосодержания в центре материала и на поверхности ( $u_{\text{ц}} - u_{\text{п}}$ ) и температуры ( $t_{\text{п}} - t_{\text{ц}}$ ) по толщине материала.

Нестационарное поле влагосодержания при сушке бумаги и картона описывается уравнением теплопроводности, а поле температуры — уравнением теплопроводности. Их аналитическое решение представляет значительные трудности.

Цель данной работы — найти упрощенную критериальную зависимость для расчета поля влагосодержания в процессе сушки плоских материалов при наличии градиента температуры. Известно [5], что градиент температуры оказывает дополнительное сопротивление переносу влаги от центральных слоев тела к поверхностным. Поэтому при наличии градиента температуры  $\frac{dt}{dx}$  перепад влагосодержания ( $u_{\text{ц}} - u_{\text{п}}$ ) больше, чем когда градиент температуры отсутствует.

Запишем дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности с учетом термовлагопроводности для одномерной задачи при условии, что градиент давления отсутствует ( $\frac{dp}{dx} = 0$ ):

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \delta_t \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right), \quad (1)$$

где  $a_m$  — коэффициент массопроводности материала;

$\delta_t$  — термоградиентный коэффициент;

$\tau$  — длительность сушки;

$x$  — координата.

Аппроксимируем распределение температуры и влагосодержания по толщине тела параболой:

$$u(x) = u_{\text{ц}} - \frac{x^2}{R^2} (u_{\text{ц}} - u_{\text{п}}); \quad (2)$$

$$t(x) = t_{\text{ц}} - \frac{x^2}{R^2} (t_{\text{ц}} - t_{\text{п}}). \quad (3)$$

Здесь  $u_{ц}$  и  $t_{ц}$  — влагосодержание и температура в центре материала;

$u_{п}$ ,  $t_{п}$  — влагосодержание и температура на поверхности материала.

$R$  — толщина материала.

Дифференцируя уравнения (2) и (3), получим:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = - \frac{2}{R} (u_{ц} - u_{п}); \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = - \frac{2}{R} (t_{ц} - t_{п}). \quad (5)$$

Из выражений (4) и (5) следует

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{t_{ц} - t_{п}}{u_{ц} - u_{п}} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}; \quad (6)$$

подставляя (6) в уравнение (1), получим:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \delta_t \frac{t_{ц} - t_{п}}{u_{ц} - u_{п}} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) \quad (7)$$

или

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m (1 - P_n) \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad (8)$$

где  $P_n = \frac{\delta_t (t_{п} - t_{ц})}{u_{ц} - u_{п}}$  — критерий Поснова, определяемый как относительный перепад влагосодержания тела, вызванный разностью температур.

Введем понятие эффективного коэффициента теплопроводности  $\tilde{a}_m$ , учитывающего наличие коэффициента  $\delta_t$ :

$$\tilde{a}_m = a_m (1 - P_n), \quad (9)$$

тогда уравнение (1) принимает более простую форму

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \tilde{a}_m \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}; \quad (10)$$

равенство (10) можно записать в виде

$$\frac{du}{d\tau} = 2\tilde{a}_m \frac{u_{ц} - u_{п}}{R^2}, \quad (11)$$

что позволяет определять перепад между центральным и поверхностными слоями непосредственно из кривой скорости сушки, зная коэффициент  $\tilde{a}_m$ . Выражение (10) можно представить также в критериальной форме

$$\frac{K_i}{2(1 - P_n)} = \frac{u_{ц} - u_{п}}{u_0 - u_p}. \quad (12)$$

Здесь  $K_i = \frac{j_m R}{a_m u_0 \rho_0}$  — критерий Кирпичева для периода постоянной скорости сушки;

$K_{i(\tau)} = \frac{R^2 du}{a_m u_0 d\tau}$  — критерий Кирпичева для второго периода.

Для периода постоянной скорости сушки, когда  $\frac{du}{d\tau} = \text{const}$ , можно предложить следующую критериальную зависимость:

$$\frac{u_0 - u(\tau)}{u_0 - u_p} = \frac{\tilde{Fo}_m Ki}{1 - Pn} \quad (13)$$

или

$$\frac{u_0 - u(\tau)}{u_{ц} - u_{п}} = 2 \tilde{Fo}_m, \quad (14)$$

где  $\tilde{Fo}_m = \frac{\tilde{a}_m \tau}{R^2}$  — эффективный массообменный критерий Фурье.

Уравнение (10) можно представить в критериальной форме и для второго периода сушки, используя предложенную А. В. Лыковым (при разработке приближенных методов расчета) линейную зависимость скорости сушки  $\frac{du}{d\tau}$  во втором периоде от среднего влагосодержания:

$$\frac{du}{d\tau} = -N \frac{u - u_p}{u_k - u_p}. \quad (15)$$

Такую же зависимость получим, если используем степенное выражение, предложенное П. А. Жучковым [2] для описания второго периода сушки при показателе степени  $n$ , близком к единице. Подставив (15) в (11), найдем:

$$\frac{u_{ц} - u_{п}}{u(\tau) - u_p} = \frac{N \tau}{2(u_k - u_p) \tilde{Fo}_m}. \quad (16)$$

Величина  $N \tau$  в уравнении (16) отвечает данному текущему влагосодержанию  $u(\tau)$  и является величиной постоянной при любом режиме сушки [3].

Следовательно, с помощью формулы (16) можно рассчитать влагосодержание в центре и на поверхности материала при любых значениях текущего влагосодержания.

Опыты по определению поля влагосодержания при контактной сушке переплетного картона (ГОСТ 7950—77, при  $u_0 = 1,5$  кг/кг;  $p_{a.c} = 780$  г/м<sup>2</sup>;  $\rho_0 = 0,65$  г/см<sup>3</sup>) проводили на экспериментальной цилиндрической сушильной установке [6] в условиях, приближенных к производственным (продолжительность нахождения образца картона на греющей поверхности и участке свободного пробега было таким же, как и на картоноделательной машине № 2 Балахнинского ЦБК, выпускающей переплетный картон).

Картон высушивали при температурах цилиндров в диапазоне от 90 до 150 °С. В процессе опыта измеряли температуру центрального и периферийного слоев образца, а также среднее и послойное влагосодержание картона. Влагосодержание в центре и на поверхности материала рассчитывали согласно методике, изложенной в работе [1], а среднюю за цикл температуру в центре и на поверхности образца определяли методом графического интегрирования:

$$\bar{t} = \frac{1}{\tau_{ц}} \int_0^{\tau_{ц}} t d\tau. \quad (17)$$

Как показали проведенные исследования, распределение  $u$  и  $t$  в процессе односторонней контактной сушки несимметрично в связи с тем, что одна из поверхностей материала находится в соприкосновении с греющей поверхностью, а противоположная — с окружающим воздухом. Градиент температуры возрастает в направлении свободной поверхности отливков.

При сушке картона на многоцилиндровых установках, при некотором допущении для приближенного метода расчета, зависимости  $u = f(x)$  и  $t = f(x)$  можно аппроксимировать в виде параболы и для обработки экспериментальных данных применить предложенные выше критериальные уравнения.

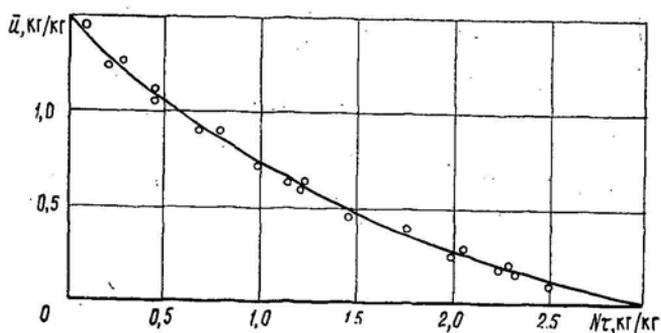
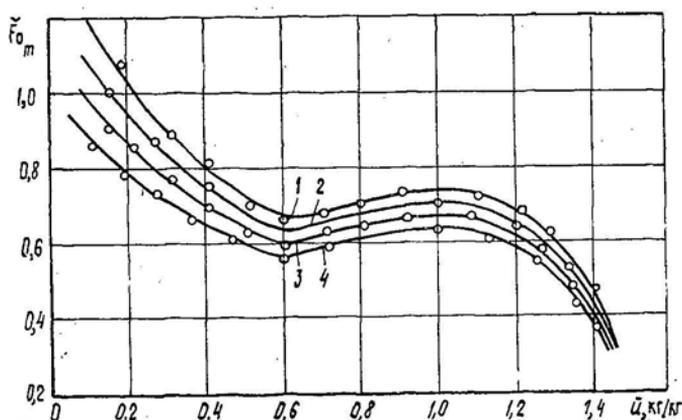


Рис. 1

Рис. 2. Изменение критерия Фурье в процессе контактной сушки: 1 —  $t_{rp} = 90^\circ\text{C}$ ; 2 —  $110^\circ\text{C}$ ; 3 —  $130^\circ\text{C}$ ; 4 —  $150^\circ\text{C}$ 

На рис. 1 представлена обобщенная кривая кинетики сушки переплетного картона контактным способом, а на рис. 2 — график изменения критерия Фурье  $\tilde{Fo}_m$  в процессе контактной сушки. Графики построены на основании полученных экспериментальных данных.

Для переплетного картона формулу (16) можно записать в виде

$$u_u - u_n = \frac{N_\tau}{2,4} \frac{u_{(\tau)}}{\tilde{Fo}_m}. \quad (18)$$

Зная текущее влагосодержание  $u_{(\tau)}$ , с помощью графиков (рис. 1, 2) определим величины  $N_\tau$  и  $\tilde{Fo}_m$  и по формуле (18) рассчитываем перепад влагосодержания  $\Delta u = u_u - u_n$ .

На основании полученного нами уравнения (16) представляется возможность рассчитать перепады влагосодержания по толщине картона при наличии в материале градиента температуры, что необходимо при выборе режимов контактной сушки влажных целлюлозно-бумажных материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1]. Бельский А. П., Лакомкин В. Ю. Экспериментальное определение коэффициента массопереноса при конвективной сушке картона // Проблемы экономики топливно-энергетических ресурсов на промпредприятиях и ТЭС: Межвуз. сб. науч.

тр. / ЛТА.— Л., 1989.— Вып. 2.— С. 163—167. [2]. Жучков П. А. Тепловые процессы в целлюлозно-бумажном производстве.— М.: Лесн. пром-сть, 1978.— 407 с. [3]. Красников В. В. Кондуктивная сушка.— М.: Энергия, 1973.— 288 с. [4]. Лыков А. В. Теория сушки.— М.: Энергия, 1968.— 471 с. [5]. Лыков А. В. Явления переноса в капиллярно-пористых телах.— М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1954.— 205 с. [6]. Самойло В. Н., Ганичев В. А. Исследование кинетики контактной сушки кабельной бумаги // Машины, конструирование, расчеты и оборудование целлюлозно-бумажных производств: Межвуз. сб. науч. тр. / ЛТА.— Л., 1979.— Вып. 7.— С. 122—126.

Поступила 7 апреля 1989 г.

УДК 676.2 : 537.213

## НЕЙТРАЛЬНАЯ ПРОКЛЕЙКА ВЛАГОПРОЧНОЙ МЕШОЧНОЙ БУМАГИ

П. Ф. ВАЛЕНДО

Белорусский технологический институт

Проклейка мешочной бумаги анионными парафиновыми дисперсиями и полиэлектролитами позволяет осуществить гетероадагуляцию парафиновых частиц в нейтральной среде и улучшить ее качественные показатели [1]. Важное эксплуатационное свойство бумажных мешков — сохранить их прочность во влажном состоянии.

В настоящей работе исследован процесс проклейки мешочной бумаги парафиновой дисперсией и полиэтиленимином в нейтральной среде с целью повышения показателей качества в сухом и влажном состоянии.

Опытную бумагу массой 80 г/м<sup>2</sup> получали из сульфатной небеленой целлюлозы (степень помола — 35 °ШР). Для проклейки бумаги в массе была применена анионная парафиновая дисперсия (ПД) с массовым содержанием 1 % [1]. Для осаждения проклевывающей дисперсии на целлюлозных волокнах в нейтральной среде взамен сернокислого алюминия использовали водорастворимые катионные полиэлектролиты — полиэтиленимин (ПЭИ) с молекулярной массой (ММ) 10 и 30 тыс. у. е. и ПЭИ, модифицированный акриламидом (10 % АА) и акриловой кислотой (40 % АК), с молекулярной массой 30 тыс. у. е. Полиэлектролит вводили в бумажную массу в два приема. Вначале в массу для осаждения дисперсии добавляли 0,2 % ПЭИ и перемешивали в течение 2 мин, а затем — остальное количество ПЭИ для увеличения прочностных характеристик бумаги в сухом и влажном состоянии и перемешивали в течение 5 мин. Из проклеенной массы на листоотливном аппарате типа ЦБТФ изготавливали опытную бумагу и после кондиционирования испытывали на стандартных приборах.

В табл. 1 приведены экспериментальные данные по влиянию природы и расхода ПЭИ с различной молекулярной массой и модифицированного ПЭИ на влагопрочность опытной мешочной бумаги (без термообработки). В табл. 1 представлено также изменение влагопрочности опытных образцов при введении индивидуальных добавок ПЭИ с молекулярной массой 30 тыс. у. е. без парафиновой дисперсии. Вла-

Таблица 1

Расход ПЭИ, %	Влагопрочность, %			
	ПЭИ (ММ 30 тыс. у. е.) + ПД	ПЭИ (ММ 10 тыс. у. е.) + ПД	ПЭИ модифицированный (10 % АА, 40 % АК) + ПД	ПЭИ (ММ 30 тыс. у. е.)
0,2	6,3	2,2	3,9	3,0
0,7	8,1	5,9	5,3	7,3
1,2	11,4	8,1	5,8	10,4
2,2	14,8	8,8	6,6	13,8
3,2	15,9	9,5	10,4	15,1