

## 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.

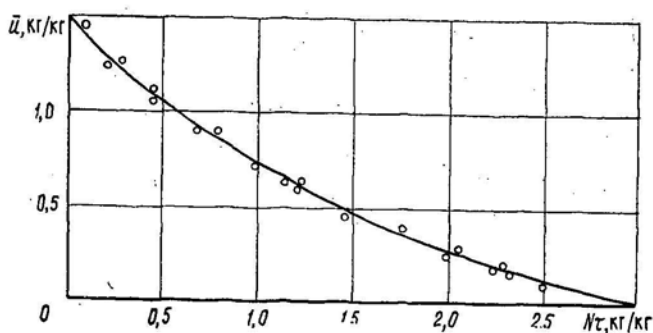
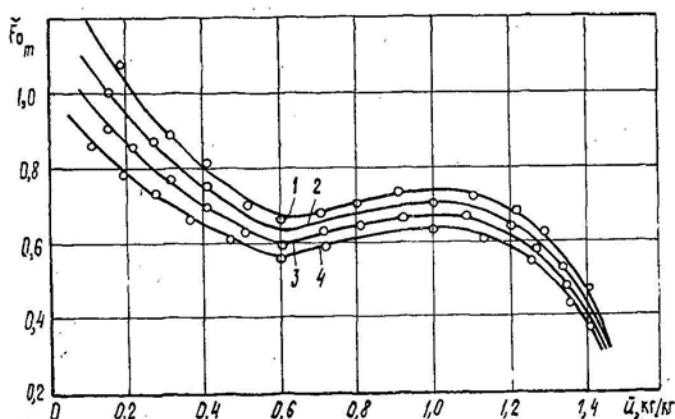


Рис. 1

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 проклеивающей 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                   |