

УДК 676.2.026.5.012.7

А.С.Щагина (асп. каф. ПТЭ, ГТУ РП), А.П.Бельский, д.т.н., проф. ГТУ РП

ИНВЕРСИЯ ТЕПЛОВЫХ И МАССОВЫХ ПОТОКОВ ПРИ КОНДУКТИВНО-КОНВЕКТИВНОЙ СУШКЕ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Сушка влажных волокнистых материалов, таких как бумага, целлюлоза и картон в большинстве случаев производится на многоцилиндровых кондуктивно-конвективных сушильных установках, состоящих из нагреваемых паром цилиндров, по которым проходит высушиваемый материал, последовательно огибая нагретые поверхности сначала одной, а затем другой стороной, в промежутке соприкасаясь с окружающим воздухом. Для снижения обрывности полотна и увеличения коэффициента кондуктивной теплоотдачи к цилиндрам верхнего и нижнего рядов бумажное полотно прижимается сушильными сетками.

По нашему предположению, бумажное полотно соприкасается с цилиндрами и сушильными сетками не всей площадью, а боковыми поверхностями отдельных волокон, которые являются тепло- и влагопроводящими элементами в структуре бумажного полотна, через которые в глубь бумажного листа распространяется теплота, а из объема листа по микрокапиллярам перемещается влага к поверхности испарения. Во время контакта с сушильным цилиндром испарение влаги происходит не только с неконтактирующей, но и с контактирующей с цилиндром поверхности влажного материала. Водяной пар при этом заполняет объемы, расположенные над менисками макрокапилляров.

Дифференциальные уравнения, описывающие теплоперенос во влажном бумажном полотне в предположении, что тепло- и влагопроводящей системой являются влажные растительные волокна, имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a^2 \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} - h_T \cdot (t - t_0^c) \quad (1)$$

Аналогичный вид имеет уравнение переноса влаги по волокнам бумажного полотна:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - h_D \cdot (P - P_0^c) \quad (2)$$

где $h_T = \alpha_0 P_s / \sigma s \rho$ — отношение расхода теплоты, отдаваемое боковой поверхностью волокна, к энтальпии влажного волокна; $a = \lambda / c \rho$ — коэффициент температуропроводности влажного волокна; t — температура волокна; t_0^c — температура среды, окружающей волокно; λ — теплопроводность влажного волокна; c — теплоемкость волокна; ρ — плотность волокна; α_0 — коэффициент теплоотдачи боковой поверхностью волокна к окружающей среде; P — парциальное давление пара у боковой поверхности влажного волокна; P_0^c — парциальное давление пара в объемах пор макрокапилляров, окружающих волокно; $h_D = \beta_s P_s / \sigma u \rho$ — отношение влаги, испаряющейся с поверхности волокна, к массе волокна; β_s — парциальное давление пара в объемах, окружающих влажные волокна; P_s — периметр волокна; σ — сечение волокна; a_m — потенциал массопроводности; u — влагосодержание волокна.

Граничные условия теплообмена влажного волокна имеют вид:

- на границе с сушильным цилиндром: $\left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=0} = H_1 \cdot (t_0 - t_1) \quad (3)$

$$\text{- на границе с окружающим воздухом: } \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=L} = -H_2 \cdot (t_L - t_2) \quad (4)$$

где $H_1 = \alpha_1/\lambda$ и $H_2 = \alpha_2/\lambda$; t_0 — температура волокна при $x = 0$; t_1 — температура поверхности сушильного цилиндра; t_L — температура на конце волокна; t_2 — температура окружающей среды.

Начальные условия:

$$f(x, 0) = f'(x) \quad (5)$$

В результате решения уравнения (1) получено конечное выражение для расчета температуры волокна по его длине:

$$t(x, \tau) = W(x) + t_0^c + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cdot e^{-\left(a^2 \cdot \lambda_n^2 + h\right) \cdot \tau} \cdot \sin(\lambda_n \cdot x + \varphi_n) \quad (6)$$

где λ_n – корни уравнения:

$$\operatorname{ctg} \lambda_n t = \frac{\lambda_n}{H_1 + H_2} - \frac{H_1 \cdot H_2}{\lambda_n (H_1 + H_2)}; \varphi_n = \operatorname{arctg} \frac{\lambda_n}{H_1};$$

c_n – коэффициент Фурье при разложении функции:

$$f(x) = W(x) - t_0; W(x) = c_1 \cdot \cosh \frac{\sqrt{h_t}}{a} x + c_2 \cdot \sinh \frac{\sqrt{h_t}}{a} x.$$

При попеременном соприкосновении бумажного полотна с нагретой поверхностью цилиндров сначала одной, а затем другой сторонами, тепловые и массовые потоки изменяют свое направление на противоположное, происходит инверсия тепловых и массовых потоков по толщине высушиваемого материала при последовательном протекании следующих теплофизических процессов:

- нагревание материала и испарение влаги при соприкосновении с поверхностью цилиндра одной стороной бумажного полотна. При этом возникает кондуктивный теплообмен, описываемый уравнением Ньютона-Рихмана [1]:

$$q_a = \alpha_{кт} \cdot (t_{гр} - \overline{t_б}), \text{ Вт/м}^2$$

где $\alpha_{кт}$ — коэффициент кондуктивного теплообмена между поверхностью цилиндра и бумажным полотном; $t_{гр}$ — температура греющей поверхности сушильного цилиндра; $\overline{t_б}$ — средняя температура бумажного полотна во время его пребывания на цилиндре;

- охлаждение бумажного полотна и испарение влаги с обеих сторон полотна на участке свободного хода, описывается уравнениями:

$$1) \text{ для потока скрытой теплоты: } q_c = \alpha_m \cdot (c_n - c_{ов}) \cdot r, \text{ Вт/м}^2$$

$$2) \text{ для потока явной теплоты: } q_{я} = \alpha_k \cdot (\overline{t_б} \pm t_в), \text{ Вт/м}^2$$

где α_m — коэффициент массообмена; α_k — коэффициент кондуктивного теплообмена; c_n , $c_{ов}$ — концентрации водяных паров у поверхности испарения и в окружающем воздухе; r — теплота парообразования.

К концу свободного хода распределение температуры в сечении материала стремится к равнобокой параболе, при этом тепловые потоки направлены не к поверхности испарения, а к центру, в результате чего процесс теплообмена замедляется. При соприкосновении бумажного полотна противоположной стороной на следующем цилиндре опять происходит перестройка температурного поля и молярные и молекулярные тепловые потоки направлены в противоположную сторону (в сторону непроницаемого цилиндра).

При поступлении влажного материала на первый сушильный цилиндр распределение влаги в нем равномерное ($du/dx = 0$), при сходе с цилиндра у контактирующей поверхности влагосодержание выше, а у открытой поверхности — ниже.

Массовые потоки под действием градиентов температуры и влагосодержания направлены в сторону открытой поверхности и способствуют ускорению сушки. На участке свободного хода влага под действием градиента влагосодержания стремится к центру материала, а из центральных слоев – к поверхности испарения. В результате этого возрастает сопротивление перемещению потока массы влаги. При поступлении полотна материала с полем влагосодержания на следующий цилиндр происходит очередная перестройка поля влагосодержания, в результате которой поток массы под действием градиента температуры направлен в сторону сушильного цилиндра, что также уменьшает скорость сушки.

Решение и анализ полученных уравнений позволит разработать мероприятия по снижению инверсии тепловых и массовых потоков в сечении бумажного полотна за счет установки дополнительных источников теплоты на участках свободного хода, изменения схемы проводки бумажного полотна по сушильной части и других мероприятий.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса.- М.-Л.:ГЭИ, 1963.- С.535
2. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики.- М.: Изд. Наука, 1972.- С.736
3. Красников В.В. Кондуктивная сушка.- М.:Энергия, 1973.- С.285
4. Жучков П.А. Тепловые процессы в целлюлозно-бумажном производстве.- Минск: Изд. Акад. наук Белорусской ССР, 1978.- С.407.