УДК 677.46.021.97.677.554

Н.В. Амелина, А.С. Клинков, М.В. Соколов, Ю.М. Михайлов

К ВОПРОСУ ТЕПЛО- МАССООБМЕНА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЛАТЕКСНЫХ НИТЕЙ

При изготовлении резиновых изделий из латекса наибольшее время всего технологического процесса занимает сушка и вулканизация. Для оптимального проектирования сушилок необходимо знать распределение температур и влагосодержания в изделии в зависимости от времени сушки и технологических параметров ее проведения. Чтобы получить эти зависимости, рассмотрим баланс тепла и влагосодержания в элементе латексной нити, как показано на рис. 1.

Баланс тепла в выделенном объеме:

$$dQ = dQ'_{\text{вх}} - dQ'_{\text{вых}} + dQ''_{\text{вх}} - dQ''_{\text{вых}} - dQ_{\text{исп}} . \quad (1)$$

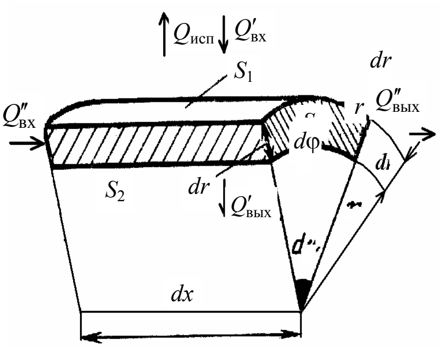

Рис. 1 Элемент латексной нити

Рассматривая баланс тепла в выделенном элементе нити имеем дифференциальное уравнение в частных производных вида:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial t}{\partial r}\right) - \frac{\varepsilon r'}{c} \times$$

$$\times \frac{\partial u}{\partial \tau} - \upsilon \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (2)$$

где υ – скорость движения нити в направлении оси x; $dm_{\text{вл}}$ – масса испарившейся влаги; ε – коэффициент фазового превращения, r' – теплота парообразования; где $m_{\text{сух}}$ – масса сухого материала в выделенном элементе объема; $du = \dfrac{dm_{\text{вл}}}{m_{\text{сух}}}$ – влагосодержание материала; $a = \dfrac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициент температуропроводности.

Баланс влаги в выделенном объеме:

$$dm_{\text{вл}} = dm'_{\text{вх}} - dm'_{\text{вых}} + dm''_{\text{вх}} - dm''_{\text{вых}} - dm_{\text{исп}} . \quad (3)$$

Рассматривая баланс влаги в выделенном элементе рис. 1 при постоянном коэффициенте переноса a_m, имеем уравнение вида:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = a_m\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right) + \upsilon\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\varepsilon\lambda}{r'\rho}\left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial t}{\partial r}\right) + \frac{\varepsilon c}{r'}\upsilon\frac{\partial t}{\partial x} . \quad (4)$$

Для решения полученной системы дифференциальных уравнений (2) и (4) связанного тепломассообмена проведем некоторые преобразования. В уравнение (2) подставим вместо $\partial u/\partial \tau$ его значение из (4).

Введем обозначения: $d = \left(a - \dfrac{\varepsilon^2\lambda}{\rho c}\right)$, $W = \upsilon\left(1 + \varepsilon^2\right)$,

$$f_1(r, x, \tau) = \frac{\varepsilon r'}{c}\left[a_m\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right) + \upsilon\frac{\partial u}{\partial x}\right],$$

$$f_2(r, x, \tau) = \left[-\frac{\varepsilon\lambda}{r'\rho}\left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial t}{\partial r}\right) + \frac{\varepsilon c}{r'}\upsilon\frac{\partial t}{\partial x}\right]. \quad (5)$$

Тогда полученную систему уравнений можно переписать в виде:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a\left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial t}{\partial r}\right) - W\frac{\partial t}{\partial x} - f_1(r, x, \tau),$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a_m\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right) + \upsilon\frac{\partial u}{\partial x} + f_2(r, x, \tau). \quad (6)$$

Для решения уравнений (6) дополним их краевыми условиями 1-го рода:

$$t(x,r,0) = 20\ ^\circ\mathrm{C}, \qquad u(x,r,0) = 0{,}8,$$
$$t(0,r,\tau) = 20\ ^\circ\mathrm{C}, \qquad u(0,r,\tau) = 0{,}8,$$
$$t(l,r,\tau) = 120\ ^\circ\mathrm{C}, \qquad u(l,r,\tau) = 0{,}2,$$
$$t(x,R,\tau) = 120\ ^\circ\mathrm{C}, \qquad u(x,R,\tau) = 0{,}2,$$
$$\frac{\partial t(0,\tau)}{\partial r} = 0, \qquad \frac{\partial u(0,\tau)}{\partial r} = 0,$$

где $l = 30$ м, $R = 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ м.

Значения коэффициентов уравнений (6) примем из результатов работы [1]: $a = a_0 + \alpha t$, $a_0 = 3{,}395 \cdot 10^{-7}$ м^2/с, $\alpha = -0{,}11 \cdot 10^{-7}$ м^2/(с·К), $\lambda = \lambda_0 + \beta t$, $\lambda_0 = 0{,}654$ Вт/(м·К), $\beta = -0{,}152 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К^2), $c = c_0 + \gamma t$, $c_0 = 1076$ Дж/(кг·К), $\gamma = 2{,}374$ Дж/(кг·К^2).

Коэффициент a_m определяем [2] по уравнению:

$$a_m = 0{,}76 \cdot 10^{-11} \exp\left[(0{,}0335 + 0{,}46 \cdot u)(T - 50) + 11{,}5 \cdot u\right]$$

где T – температура, K.

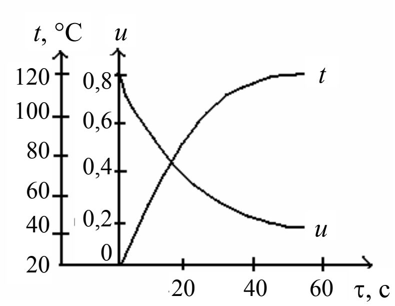

Рис. 2 Зависимость влагосодержания и температуры в латексной нити от времени сушки

Остальные значения параметров: $\upsilon = 0{,}5$ м/с; $\rho = 1000$ кг/м^3; $\varepsilon = 0{,}8$; $r' = 2{,}52 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Решение уравнений связанного тепло- массообмена проводилось численным способом на ЭВМ с использованием метода прогонки.

Результаты расчета для случая $\frac{r}{R} = 0{,}1$ приведены на рис. 2. Величина и характер изменений температуры и влагосодержания дают удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными по сушке латексных нитей конвективным способом (расхождение не более 12 %).

Полученные результаты расчета позволяют выбрать режимы сушилок и дать рекомендации по ее конструкции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Напарьин Ю.А. и др. Теплофизические свойства резин и полиуретанов // Каучук и резина. 1981. № 2. С. 29.

2 Рудобашта С.П. и др. Кинетические закономерности процесса сушки латексных пленок // Каучук и резина. 1977. № 1. С. 11 – 13.

3 Смирнов М.М. Дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка. М.: Наука, 1964. 523 с.

Кафедра «Переработка полимеров и упаковочное производство»