

УДК 677.027.16

**КРИТЕРИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ МАССООБМЕНА
ПРИ СУШКЕ ЛЬНЯНОЙ ПРЯЖИ В ПАКОВКАХ**

**THE CRITERION EQUATION OF MASS EXCHANGE
IN THE DRYING PROCESS OF FLAX YARN IN PACKAGES**

А.С. ГУБАНОВ, Н.В. КИСЕЛЕВ
A.S. GUBANOV, N.V. KISELEV

(Костромской государственный технологический университет)
(Kostroma State Technological University)
E-mail: kstu-tplv@yandex.ru

Приведены результаты исследований процесса конвективной сушки льняной пряжи. Получено критериальное уравнение массообмена.

The results of studies of the process of convective drying of flax yarn in packages are shown. The criteria equation of mass transfer is obtained.

Ключевые слова: сушка, льняная пряжа, паковка, массообмен.

Keywords: drying, flax yarn, mass transfer.

Одним из приоритетных направлений модернизации экономики Российской Федерации является повышение энергоэффективности технологических процессов. В льняной отрасли текстильной промышленности эта проблема ощущается особенно остро. При этом наиболее энергоемким является отделочное производство, где потребление воды достигает 60...70% [1], электроэнергии – 44,4%, а тепловой энергии – 69% в общем балансе предприятий. При этом удельное потребление тепла аппаратов периодического действия для обработки паковок почти на порядок превышает показатели отделочных линий [2].

На отечественных текстильных предприятиях широко используется для сушки

паковок пряжи под давлением отечественный аппарат СКД-6. По паспортным данным время сушки пряжи и ниток составляет 150...290 мин. При этом для льняной пряжи фактическое время сушки составляет в среднем 4 часа. В работе [3] показано, что при коэффициенте вариации по проницаемости на уровне 30%, имеющем место в производственных условиях, время сушки увеличивается в 2,5 раза. В результате при досушивании небольшого количества паковок с низкой проницаемостью тепло не расходуется на процесс сушки, поскольку основная масса пряжи уже высохла, а теряется с охлаждающей водой, что увеличивает энергозатраты. Повысить энергоэффективность процесса, на наш

взгляд, можно путем автоматического регулирования расхода охлаждающей воды в зависимости от влажности или температуры воздуха на выходе из паковок. При этом неиспользованный потенциал сушильного агента на заключительной стадии процесса будет использоваться в режиме рециркуляции.

Предварительную оценку эффективности предлагаемого решения целесообразно проводить с использованием компьютерной модели процесса. В силу невозможности прямого моделирования теплообменных процессов в многоуровневой капиллярно-пористой структуре паковки

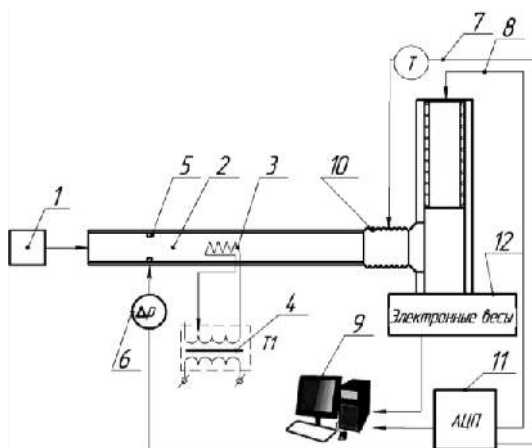


Рис. 1

Эксперименты выполнялись на установке (рис. 1 – схема экспериментальной установки: 1 – воздуходувка; 2 – труба подвода воздуха; 3 – нагревательный элемент; 4 – трансформатор; 5 – диафрагма; 6 – датчик дифференциального давления; 7 – датчик температуры; 8 – датчик относительной влажности воздуха; 9 – компьютер; 10 – гибкий шланг; 11 – аналогоцифровой преобразователь; 12 – электронные весы), сушка производилась при следующих параметрах: плотность намотки 295...446 кг/м³, толщина слоя намотки 10,5...25,5 мм, расход воздуха 1,5...7,1 л/с, температура 78...102°C, начальная влажность материала 67...140%. Обработка данных по методике [4] выполнялась в автоматическом режиме в среде LabVIEW. Полученные кривые сушки паковок льняной пряжи представлены на рис. 2. Отмечается, что большая часть процесса проте-

предлагается использовать модельный подход [4], основанный на использовании критериального уравнения массообмена.

В работах [4], [5] приведены результаты исследования массообмена при конвективной сушке слоя льняной тресты и получены соответствующие критериальные уравнения. Можно предположить, что в силу сходства фильтрационных и массообменных процессов, а также структуры материала при сушке слоя тресты и пряжи в паковках интенсивность массообмена подчиняется аналогичному уравнению, коэффициенты которого должны определяться из эксперимента.

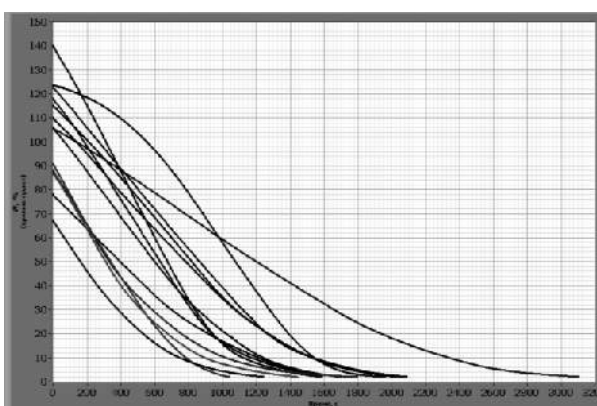


Рис. 2

кает при постоянной скорости сушки, снижение которой начинается лишь при влажности на 15...30%.

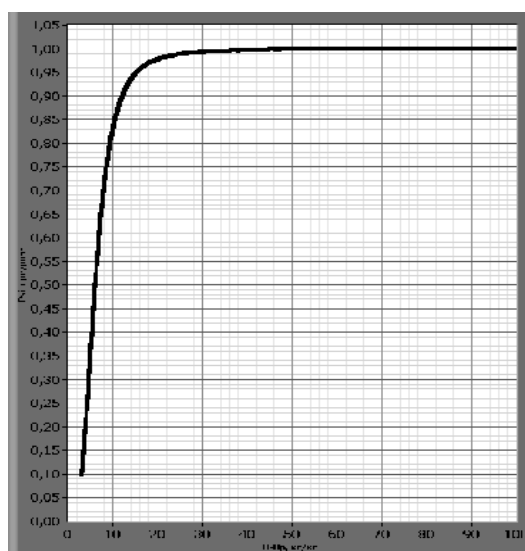


Рис. 3

Это хорошо видно на рис. 3, где представлена зависимость относительной скорости сушки паковок льняной пряжи от влажности, аппроксимированная по формуле Г.К.Филоненко [6], с границами доверительного интервала (почти совпадающим с кривой зависимости), соответствующими уровню значимости 0,95. В работе [6], где изучался этот параметр при сушке льняной тресты, показано, что он зависит от качества рыхления слоя, то есть его однородности. Утечка сушильного агента с неиспользованным потенциалом сушки через неплотности в структуре материала способствует снижению скорости сушки по сравнению с максимальной теоретической.

Действительно, визуальные наблюдения за процессом сушки паковок показывают, что снижение скорости сушки начинается в момент выхода сухого слоя на поверхность паковки. Это происходит на локальном участке ее поверхности, обычно в виде кольца, в силу наличия в паковке (в той или иной степени) жгутовой намотки, обусловленной преждевременным сбросом пряжи из канавки мотального барабанчика. При этом непосредственно за жгутом образуется участок пониженной плотности, который высыхает быстрее за счет более высокой скорости фильтрации. Таким образом, можно отметить, что относительная скорость сушки паковок крестовой намотки определяется в первую очередь качеством намотки, связанным с износом мотального барабанчика и работой механизма прерывателя мотальной машины. По результатам статистической обработки данных экспериментов для паковок льняной пряжи, сформированных в производственных условиях, уравнение Г.К. Филоненко имеет вид:

$$\psi = \frac{(U - U_p)^{3,15 \pm 0,057}}{(0,00014 \pm 0,00002) + (U - U_p)^{3,15 \pm 0,057}}, \quad (1)$$

где ψ – относительная скорость сушки; U – влажность, кг/кг; U_p – равновесная влажность пряжи, кг/кг.

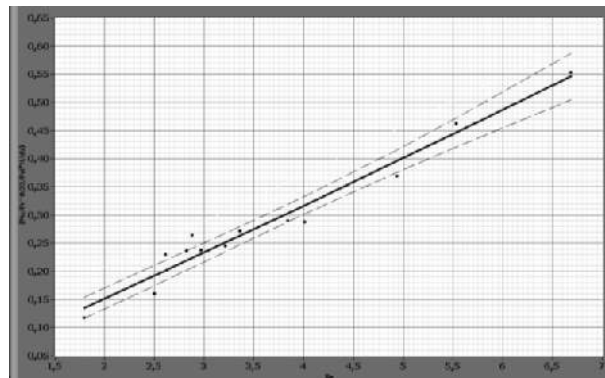


Рис. 4

Определение коэффициентов в критериальном уравнении массообмена при сушке льняной пряжи выполнялось путем его аппроксимация степенной функцией вида (2), график которой представлен на рис. 4:

$$\frac{Nu_d}{Pr_d^{0,33} \psi \frac{d_3}{H}} = C Re^a. \quad (2)$$

При вычислении числа Рейнольдса в качестве определяющего размера, по аналогии с [5], принимался эквивалентный диаметр слоя пряжи при движении среды перпендикулярно оси пряжи (формула (3)), в качестве скорости фильтрации принималось среднее значение по толщине слоя:

$$d_3 = 2d_n \left(\frac{\delta}{\rho} - 1 \right), \quad (3)$$

где d_n – условный диаметр пряжи, м; δ – плотность пряжи, кг/м³; ρ – плотность намотки, кг/м³.

Условный диаметр пряжи определялся как [7]:

$$d_n = 3,57 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{1000 T}{\delta}}, \quad (4)$$

где T – линейная плотность пряжи, текс.

Таким образом, выражение для Re имело вид:

$$Re = \frac{4 Q d_3}{\pi \nu h (D + d) \left(\frac{\delta}{\rho} - 1 \right)}, \quad (5)$$

где Q – расход воздуха через паковку, $\text{м}^3/\text{с}$; ν – кинематический коэффициент вязкости воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$; D – наружный диаметр паковки, м ; d – внутренний диаметр паковки, м .

За определяющую температуру принималось среднее между температурой входящего воздуха и температурой мокрого термометра, вычисляемой программой в среде LabVIEW по алгоритму [4].

Данные рис. 4 показывают, что в случае конвективной сушки льняной пряжи в условиях опытов скорость сушки пропорциональна числу Рейнольдса, как это имело место при сушке льняной тресты.

Коэффициенты регрессии рассчитаны для диапазона влажности 2...100%. После статистической обработки данных 12 опытов получено следующее уравнение:

$$\text{Nu}_d = (0,073 \pm 0,008) \text{Re}^{1,06 \pm 0,07} \text{Pr}_d^{0,33} \psi \frac{d_3}{H}, \quad (6)$$

где H – толщина слоя пряжи на паковке, м .

ВЫВОДЫ

Показана аналогия процессов массообмена при конвективной сушке льняной тресты и льняной пряжи в паковках, получено уравнение для относительной скорости сушки и критериальное уравнение

массообмена при сушке паковок льняной пряжи.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Каравайков В.М.* Энергоемкость процессов отделки пряжи и ровницы в цилиндрических паковках // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2003, №1.
2. *Каравайков В.М.* Энергетический баланс текстильного производства // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2003, №2.
3. *Киселев Н.В.* Развитие теории процессов распределения рабочих сред и совершенствование аппаратов для жидкостной обработки и сушки паковок: Дис. ... докт. техн. наук. – Кострома, 2008.
4. *Васильев Ю.В.* Совершенствование технологии и оборудования для сушки стланцевой льняной тресты: Дис. ... канд. техн. наук. – Кострома, 2013.
5. *Хомуцкий Н.Д.* Критериальные уравнения массообмена для тонких лубоволокнистых материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1964, №5. С.27.
6. *Хомуцкий Н.Д.* Относительная скорость сушки тонких лубоволокнистых материалов // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1963, №2. С.46.
7. Свойства волокон и нитей [электронный ресурс]. Режим доступа: <http://brezent.net/read/1/05.htm>

Рекомендована кафедрой теории механизмов и машин, деталей машин и проектирования технологических машин. Поступила 30.09.14.