

ИССЛЕДОВАНИЕ МАССООБМЕНА ПРИ СУШКЕ ЛЬНЯНОЙ ТРЕСТЫ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ*

THE STUDIES OF MASS EXCHANGE IN THE DRYING PROCESS OF FLAX STOCKS LAYER WITH HIGH DENSITY

А.Г.НОСОВ, Н.В.КИСЕЛЕВ
A.G.NOSOV, N.V.KISELEV

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

Приведены результаты исследований процесса конвективной сушки льняной тресты высокой плотности. Уточнено критериальное уравнение массообмена.

The results of studies of the process of convective drying of flax stock with high density are considered. The criteria equation of mass transfer is corrected.

Ключевые слова: сушка, льняная треста, массообмен.

Keywords: drying, flax stock, mass transfer.

Одной из причин низкой рентабельности производства льняного сырья в Российской Федерации является плохое качество льнотресты, потеря значительной части урожая, связанные с неблагоприятными погодными условиями и несоблюдением сроков уборки. Наиболее надежным способом решения этой проблемы является искусственная досушка льняной тресты [1], [2] непосредственно в рулонах комбайновой уборки, которая может быть организована как в льносеющих хозяйствах, так и непосредственно на льнозаводах перед закладкой сырья на хранение. Существующие сушильные машины для льнотресты в рулонах типа СЛР-3, СЛР-3 М2 и другие не получили широкого распространения, в том числе вследствие недостаточной эффективности. В связи с этим работа по модернизации данной машины, направленная на снижение эксплуатационных затрат, повышение производительности и энергоэффективности, представляется актуальной. При этом на этапе НИОКР необходимы данные об объекте сушки, характеризующие показатели интенсивности массообмена, непосредственно влияющие на скорость сушки.

В работах [3], [4] приведены результаты исследования массообмена при конвективной сушке слоя льняной тресты и получены соответствующие критериальные уравнения вида:

$$Nu_d = C Re^a Pr_d^{0,33} \Psi \frac{d_э}{H}, \quad (1)$$

где Ψ – относительная скорость сушки.

Однако данные исследования проводились применительно к слоевой сушке тресты с невысокой плотностью (23...58 кг/м³ [3], 63...128 кг/м³ [4]). При прессовании льнотресты в рулоны плотность в средней части рулона может достигать 200 кг/м³ [1]. Следствием этого является резкое уменьшение числа Рейнольдса [2, ф. (3.39)]:

$$Re = \frac{\omega_{ст} d_э}{\nu} = \frac{\omega_{ст} \left(\frac{\beta}{P} - 1\right)}{\nu \left(1 - \frac{P}{\beta}\right)} = \frac{\omega_{ст} \beta}{\nu P}, \quad (2)$$

где P – объемная плотность загрузки тресты, кг/м³; β – тяжеловесность льна, кг/м³; $d_{ст}$ – средний диаметр стебля, м; $d_э$ – эквивалентный гидравлический диаметр

* Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки, код проекта 1092.

слоя, м; $\omega_{сл}$ – скорость воздуха в слое с учетом пористости, м/с; ω – скорость воздуха на входе в слой, м/с; ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

Опыты [3] выполнялись при $Re=220...1000$, опыты [4] – при $Re=80...360$. Можно предположить, что при меньших значениях числа Рейнольдса скорость сушки останется пропорциональной этому критерию, в силу сохранения ламинарного режима, однако коэффициент пропорциональности C в формуле (1) нуждается в уточнении. В критериальное уравнение (1) входит также относительная

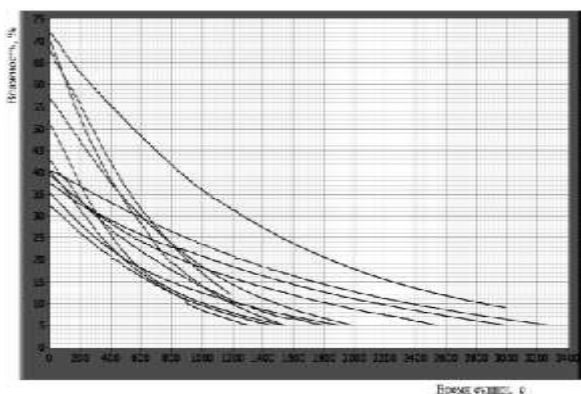


Рис. 1

Обработка полученных данных по методике [4], выполняемая в автоматическом режиме в среде LabVIEW, позволила определить коэффициенты в критериальном уравнении массообмена, а также в уравнении Г.К.Филоненко для относительной скорости сушки.

Зависимость относительной скорости сушки от разности текущей и равновесной влажности тресты дана на рис. 2. Анализ его подтверждает, что относительная скорость сушки зависит от однородности

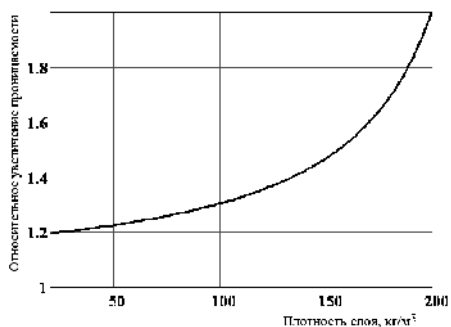


Рис. 3

скорости сушки, связанная с параметрами самого объекта сушки (влагосодержание, равномерность слоя по плотности, степень рыхления [5]).

Эксперименты выполнялись на модернизированной установке [6], сушка производилась при следующих параметрах: объемная плотность 130...180 кг/м³, диаметр стебля 0,8...1,3 мм, длина 0,1...0,14 м, скорость воздуха 0,9...3,2 м/с, температура 73...97°C, начальная влажность тресты 33...73%. Полученные кривые сушки представлены на рис.1.

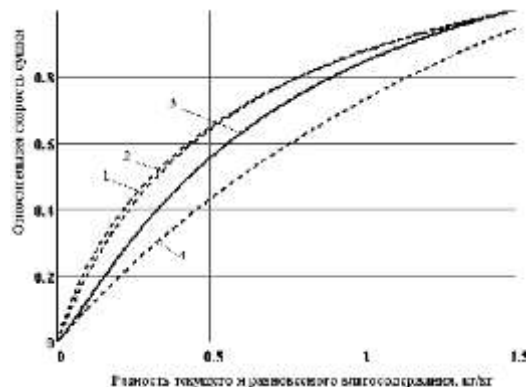


Рис. 2

слоя, как это указано в [5]. Так, зависимости 1 и 2 для вертикального слоя с низкой плотностью при продольной продувке показывают более высокую относительную скорость сушки вследствие хорошей однородности слоя. Кривая 4, полученная при поперечной продувке слоя, демонстрируют понижение относительной скорости сушки, что объясняется более высокой неоднородностью слоя и увеличением, как следствие, утечек сушильного агента через участки с пониженной плотностью [5].

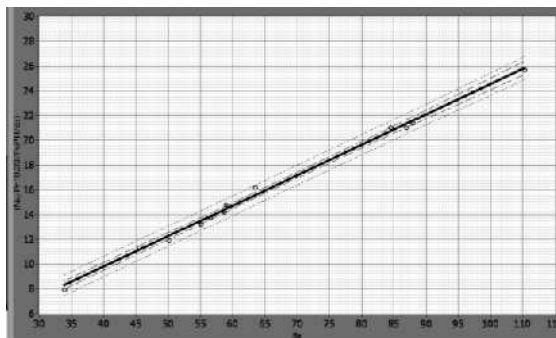


Рис. 4

В слое высокой плотности, даже при продольной продувке, скорость сушки (кривая 3) снижается, что можно объяснить только повышенной неоднородностью слоя. Действительно, в слое высокой плотности небольшие ее колебания вызывают значительные колебания проницаемости. Это подтверждает рис. 3, где представлено относительное увеличение проницаемости слоя при снижении средней плотности на 10%, рассчитанное по зависимости [7].

Таким образом, можно констатировать, что при повышении средней плотности слоя тресты влияние неоднородности слоя по плотности на скорость сушки усиливается.

Определение коэффициентов в критериальном уравнении массообмена (1) выполнялось путем его аппроксимации степенной функцией вида (3), график которой представлен на рис.4:

$$\frac{Nu_d}{Pr_d^{0,33} \psi \frac{d_э}{H}} = C Re^a. \quad (3)$$

Коэффициенты регрессии рассчитаны для диапазона влажности 5...50% при числе Рейнольдса 33...110, получено следующее уравнение:

$$Nu_d = (0,244 \pm 0,024) Re^{1,00 \pm 0,023} Pr_d^{0,33} \psi \frac{d_э}{H}. \quad (4)$$

Сравнение с аналогичным уравнением для стланцевой льнотресты [3], полученного для тресты плотностью 63...128 кг/м³:

$$Nu_d = (0,206 \pm 0,03) Re^{1,01 \pm 0,02} Pr_d^{0,33} \psi \frac{d_э}{H}, \quad (5)$$

позволяет отметить, что в слое повышенной плотности (130...180 кг/м³), при прочих равных условиях, разница в интенсив-

ности массообмена при конвективной сушке оказалась статистически незначимой.

ВЫВОДЫ

1. Повышение плотности слоя льняной тресты усиливает отрицательное влияние его неоднородности по плотности на относительную скорость сушки.

2. Уточнены коэффициенты в критериальном уравнении массообмена при конвективной сушке слоя тресты высокой плотности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубкова И.А. Совершенствование технологии подготовки льнотресты в рулонах к механической переработке: Дис. ... канд. техн. наук.– Кострома, 2000.
2. Шушков Р.А., Кузнецов Н.Н., Орбинский Д.Ф. Обоснование способа досушивания прессованного в рулоны льна // Молочнохозяйственный вестник. – 2012, №2 (6), II кв. С.85.
3. Хомуцкий Н.Д. Критериальные уравнения массообмена для тонких лубоволокнистых материалов //Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1964, №5. С.27.
4. Васильев Ю.В. Совершенствование технологии и оборудования для сушки стланцевой льняной тресты: Дис. ... канд. техн. наук.– Кострома, 2013.
5. Хомуцкий Н.Д. Относительная скорость сушки тонких лубоволокнистых материалов //Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1963, №2. С.46.
6. Васильев Ю.В., Киселев Н.В., Пашин Е.Л. Автоматизация исследования в среде LABVIEW процесса сушки льняной тресты // Мат. Всероссийской научн.-практ. конф.: Производственная инфраструктура: экономические, технико-технологические, организационно-управленческие и информационные аспекты. – Кострома: КГУ им.Н.А.Некрасова, 27-28 мая 2011 г. С.25...32
7. Гаврилова А.Н. Уравнение для определения гидравлического сопротивления льносоломы при вертикальном расположении стеблей // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.– 1986, №5.

Рекомендована кафедрой технологии производства льняного волокна. Поступила 29.09.14.