

УДК 677.057.135.2

МЕТОД РАСЧЕТА СЕКЦИОННОЙ СУШИЛКИ

И.П. КОРНЮХИН, Л.И. ЖМАКИН, И.В. КОЗЫРЕВ

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)

В работах [1, 2] анализировались известные методы расчета секционных сушильных машин. В первой отмечалось, что существующие методы либо не учитывают, либо предполагают постоянным распределение присосов по длине сушильной машины. Там же был предложен приближенный метод расчета распределения присосов по длине машины в зависимости от расположения точки сброса воздуха, что позволило предсказать значения расходов влажного воздуха, перетекающего из секции в секцию.

В [2] говорилось, что в известных методах расчета выбор параметров влажного воздуха в секциях в некотором роде произволен. Там же было показано, что причина этого заключается в том, что используемая система уравнений не замкнута, значения параметров воздуха в секции не связываются с величиной поверхности нагрева в калориферах, с давлением (температурой) греющего пара. Преодолеть этот недостаток можно, включив уравнения теплового и материального баланса секций в систему уравнений для расчета сушилки. Такая система уравнений была получена в [2 и 3].

В настоящей работе предлагается методика поверочного теплотехнического расчета секционной сушильной машины. Предполагается, что проектный (конструктивный) расчет выполнен на базе существующих приближенных оценок и выбрано основное теплотехническое оборудование – калориферы, вентиляторы; спроектирована система циркуляции воздуха. Заметим, что при проведении поверочного рас-

чета характеристики и типы оборудования могут уточняться.

Таким образом, в качестве исходных данных для поверочного расчета приняты: производительность циркуляционных вентиляторов, величина поверхности нагрева в калорифере и его характеристики, расположение точек (точки) отвода воздуха из сушилки, производительность сбросных вентиляторов, теплоизоляционные характеристики ограждений сушилки. Известными также считаются давление греющего пара, а следовательно, и температура насыщения, температура и влагосодержание окружающего воздуха, температура и влагосодержание ткани на входе в сушилку.

В [2] в качестве базового варианта в расчетах рассматривали сушильно-ширильную машину фирмы Textima, для которой известен ряд конструктивных характеристик [3], а также некоторые результаты промышленных теплотехнических испытаний [4]. Для того, чтобы проанализировать влияние расположения точек сброса воздуха на закономерности сушки в секционной машине, в работе, помимо базового, были рассмотрены еще 3 варианта расположения точек сброса, схематически представленных на рис. 2 в [2].

Как показано в [5], в каждой из секций сушилки можно выделить 4 основных зоны, в которых происходит изменение параметров воздуха: зона сушки, зона контакта с ограждениями, характеризующаяся потерями теплоты в окружающую среду, зона смешения потоков воздуха (циркулирующего, присасываемого из окружающей

среды и из соседних (соседней) секций), а также зона нагрева воздуха в калорифере.

В этой же работе расходы и параметры воздуха в каждой из зон выражены через заданные параметры (либо достаточно просто выражающиеся с помощью известных характеристик оборудования), а также через производительность секции по испаренной влаге и среднюю температуру ткани в зоне сушки. Две последние характеристики не заданы; они определяются ин-

$$M_f c_f \left(1 + W \frac{c_\ell}{c_f}\right) \frac{dt}{d\tau} = (\alpha_c + \alpha_r)(t_a - t)F + rM_f \frac{dW}{d\tau}, \quad (1)$$

$$M_f \frac{dW}{d\tau} = \mu_v \beta \frac{\chi_a - \chi}{1 - \chi} F, \quad (2)$$

где M_f – масса ткани при отсутствии в ней влаги; c_f , c_ℓ – удельные массовые теплоемкости материала ткани и жидкости соответственно; W – влагосодержание ткани; t , t_a – температуры ткани и набегающего на ткань влажного воздуха соответственно; τ – время; α_c , α_r – коэффициенты теплоотдачи за счет конвекции и излучения соответственно; F – площадь поверхности ткани; r – удельная теплота фазового перехода, включающая и энергию

$$\left(1 + W \frac{c_\ell}{c_f}\right) \frac{dt}{dX} = B \left[\left(\frac{\ln(1 + \psi)}{(1 + \psi)^B - 1} + \frac{\alpha_r}{\tilde{\alpha} B} \right) (t_a - t) - \frac{r}{c^v} \ln(1 + \psi) \right], \quad (3)$$

$$\frac{dW}{dX} = -\frac{c_f}{c^v} B \ln(1 + \psi), \quad (4)$$

где

$$B = \frac{c^v \mu_v}{c_f} Le^{1-n}; \quad \psi = \frac{\chi - \chi_a}{1 - \chi};$$

$$X = \frac{\tilde{\alpha} \tau}{2m_f c_f} = \frac{\tilde{\alpha} x}{2m_f c_f w_f}; \quad (5)$$

$\tilde{\alpha}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией при малой интенсивности массообмена [7,

тенсивностью теплообменных процессов в зоне сушки.

В свою очередь, интенсивность этих процессов зависит от влагосодержания набегающего на ткань потока воздуха. Нетрудно заметить, что такая связь диктует необходимость использования в расчетах итерационной процедуры.

Изменение характеристик влажного материала описывается системой дифференциальных уравнений теплообмена [6]:

связи влаги с материалом; μ_v – молярная масса влаги; β – коэффициент массоотдачи; χ_a – молярная доля пара в набегающем на ткань воздухе; χ – равновесное значение молярной доли пара на поверхности влажного материала.

Преобразуем систему уравнений (1 и 2), воспользовавшись теплообменной аналогией [7, 8], и введем поправки на конечную скорость массообмена согласно пленочной теории [7, 8].

Подставив (2) в (1) и введя безразмерный аргумент X , получим:

8]; c^v , c – теплоемкость водяного пара и влажного воздуха соответственно; μ – молярная масса влажного воздуха; $Le = D/a$ – число Льюиса-Семенова влажного воздуха; D – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе; a – температуропроводность влажного воздуха; m_f – поверхностная плотность ткани (масса 1 м^2); w_f – скорость проводки ткани; x – координата в направлении движения ткани.

При значениях параметров системы, соответствующих условиям сушки, влажный воздух и его компоненты с хорошей

точностью можно рассматривать как идеальный газ. В этом случае связь между молярной долей пара и относительной влажностью воздуха φ можно представить в виде

$$\chi = \frac{\varphi p_s}{p}, \quad (6)$$

где p – барометрическое давление; p_s – давление насыщенного пара.

При вычислении молярной доли пара в воздухе по формуле (6) давление насыщенного пара определяется по температуре воздуха, а при вычислении χ на поверхности материала – по его температуре. Равновесное значение относительной влажности на поверхности материала при влагосодержаниях, превышающих максимальное гигроскопическое при десорбции, принято равным 1 в соответствии с результатами из [9]. В гигроскопической области равновесная относительная влажность определялась при помощи уравнений изо-термы десорбции, полученных в [10].

Сопоставление такой методики расчета тепломассообмена с экспериментальными данными, описывающими кривую сушки при постоянных параметрах воздуха, дает следующие результаты. В тех случаях, когда тепло- и массообменные числа Био малы по сравнению с 1, расчет хорошо согласуется с экспериментом [6].

Аналогичный вывод можно сделать при сопоставлении с результатами, приведенными в [11], однако с ростом температуры согласие между результатами расчета и эксперимента ухудшается. Объяснить это расхождение можно тем, что при увеличении температуры воздуха растет интенсивность процессов тепломассообмена. Это, по-видимому, приводит к увеличению одного или обоих чисел Био настолько, что их значения выходят за пределы, характерные для тонких материалов. В то же время опытные данные [12] для хлопчатобумажной ткани, полученные в достаточно жестком режиме сушки (сопловой обдув при температуре воздуха 154°C), удовлетворительно согласуются с результатами расчета.

Необходимо отметить, что публикуемые в литературе экспериментальные данные по кривым сушки не содержат полной информации, которая была бы нужна для надежного сопоставления результатов эксперимента с расчетом. Как правило, не известны значения коэффициента диффузии влаги в материале, что не позволяет оценить значение массообменного числа Био. Зачастую отсутствует информация об интенсивности процессов тепломассообмена, поэтому значение коэффициента теплоотдачи $\tilde{\alpha}$ приходится подбирать по линейному участку кривой сушки. Не всегда указывается и поверхностная плотность материала.

В промышленных экспериментах [4] использовалась ткань следующего состава в долях по сухой массе: шерсть ($c_1 = 0,24$); вискоза ($c_2 = 0,36$); нитрон ($c_3 = 0,40$). Для этой же ткани проводились расчеты в данной работе. Смесовой состав ткани обуславливает некоторые особенности расчета равновесных значений параметров. Благодаря тому, что наличие межволоконной влаги в гигроскопической области практически исключается [10], влагосодержание смеси можно рассматривать как аддитивную величину:

$$W = \sum_{i=1}^3 c_i W_i. \quad (7)$$

Из-за пренебрежимо малой сорбционной способности нейтрона суммирование в (7) ограничивается двумя компонентами. Аналогичная зависимость может быть использована для нахождения энергии связи влаги с волокнами в смеси.

Задача отыскания в гигроскопической области равновесной относительной влажности по известным значениям температуры и влагосодержания смеси решается на основе нелинейного уравнения, записанного на основе формулы (7):

$$f(\varphi) \equiv W(T) - \sum_{i=1}^3 c_i W_i(T, \varphi) = 0, \quad (8)$$

где зависимости влагосодержания компонентов смеси от температуры и относительной влажности определяются формулами, приведенными в [10]. На каждом шаге вычислений это уравнение решалось относительно φ итерационным методом секущих. При влагосодержаниях, превышающих максимальное гигроскопическое влагосодержание для смеси, значение φ принималось равным 1. Последнее рассчитывалось по формуле (7) по соответствующим значениям для компонентов смеси.

Для базового варианта сушилки значения влагосодержаний на входе $W = 0,84$ и на выходе $W = 0,074$, а также скорость движения ткани $w_f = 43 \text{ м/мин} = 0,716667 \text{ м/с}$ рассматривались как заданные, соответствующие условиям испытаний [4]. Для остальных вариантов сушилок рассчитывалась скорость движения ткани, обеспечивающая то же самое влагосодержание на выходе при неизменных влагосодержаниях на входе и условиях теплообмена между тканью и воздухом, а также фиксированных конструктивных характеристик, за исключением расположения точки (точек) сброса воздуха.

По методике [1] рассчитывается распределение присосов по длине машины и в соответствии со схемой рис. 2 из [2] определяются расходы воздуха, перетекающего из секции в секцию, причем суммарный расход отводимого из сушилки воздуха определялся производительностью вытяжных вентиляторов. Для всех четырех рассматриваемых вариантов расположения точек сброса он принят одним и тем же. Чтобы учесть подсосы через торцевые поверхности, условно рассматривалась сушилка с 9 секциями (с 0-й по 8-ю) и сумма присосов в 0-й и 1-й секциях относилась к 1-й секции, а в 7-й и 8-й – к 7-й секции.

При известном распределении расходов воздуха балансовые уравнения для секций [5] совместно с уравнениями теплообмена (3, 4) и уравнениями, описывающими сорбционное равновесие, образуют замкнутую систему; причем расход влаги, испаренной в пределах секции, определялся по разности влагосодержаний ткани на

ее границах. В пределах секции параметры воздуха, набегающего на ткань, постоянны и скачком изменяются от секции к секции.

Связь между параметрами воздуха в соседних секциях определяется величиной присосов, перетечками воздуха между секциями, интенсивностью теплообменных процессов и непрерывным характером изменения параметров ткани при переходе из одной секции в другую и рассчитывается по балансовым уравнениям [5]. По причине достаточно высокой концентрации влаги в воздухе при расчете сушилки помимо температурной учитывалась и концентрационная зависимость физических параметров воздуха.

Весь расчет выполнялся итерационным методом. Вначале задавались значения влагосодержаний D_b и D_c , а также температур t_c , t_b , t_h , t_m по секциям [5]. В качестве исходного приближения принимались одинаковые значения каждого из указанных параметров во всех секциях сушилки.

По этим данным вычислялись значения теплоемкостей влажного воздуха и уточнялись значения указанных параметров по уравнениям, приведенным в [5]. Среднее значение температуры ткани в сушилке определялось путем численного интегрирования по методу трапеций. Система дифференциальных уравнений теплообмена (3, 4) решалась методом Рунге-Кутты-Мерсона с автоматическим выбором шага. Погрешность вычислений на каждом шаге принята равной 10^{-6} , расчеты проводились с удвоенной точностью.

При расчете основного варианта сушилки значение коэффициента теплоотдачи не удалось рассчитать достаточно точно, так как не была точно известна скорость набегающего воздуха на ткань. Поэтому его значение было определено приближенно и уточнялось в процессе итераций. Это значение сохранялось неизменным при расчете остальных вариантов сушилок, в которых итерации проводились с целью определения скорости ткани при заданном влагосодержании на выходе.

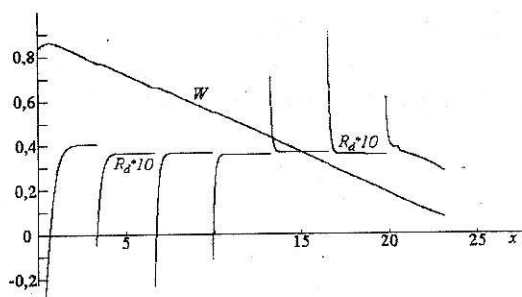


Рис. 1

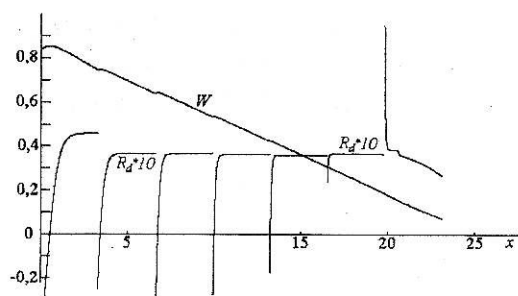


Рис. 2

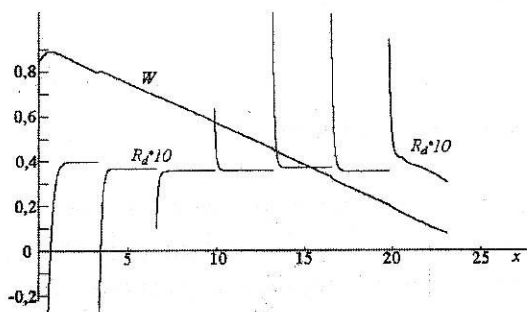


Рис. 3

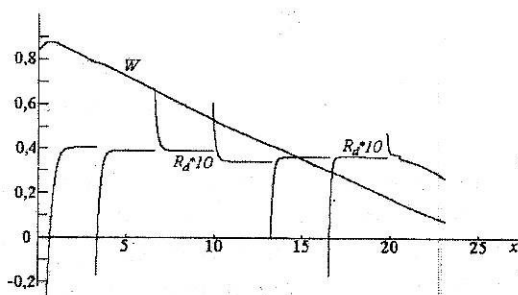


Рис. 4

В качестве примера на графиках рис. 1...4 представлены зависимости, характеризующие изменение по длине сушилки величин влагосодержания ткани (кривая сушки) и скорости сушки, которая в данном случае определена как $R_d = -dW/dX$.

Графики на рис. 1...4 относятся соответственно к сушилкам с двумя точками сброса воздуха во 2 и 6-й секциях (базовый вариант); с точкой сброса в центре сушилки (в 4-й секции); на входе ткани (во 2-й секции) и на выходе ткани (в 6-й секции).

ЛИТЕРАТУРА

1. Корнюхин И.П., Жмакин Л.И., Козырева Л.И. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, №3. С.115...119.
2. Корнюхин И.П., Жмакин Л.И., Козырев И.В. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2001, №3. С.101...105.
3. Бунин О.А., Малков Ю. А. Современное оборудование для сушки ткани. – М.: ЦНИИТЭИлегпищемаш, 1971.
4. Сравнительные испытания сушильно-ширительных машин фирм Драберт, Тексима и марки

СПЗ-180-1 / Бунин О.А., Коньков А.И., Молоков В.Л. и др. // Отчет по теме 37-2-71 Ивановского НИИЭКМИ, Ивановского СКБ КОО, ЦНИИшерсти. – Иваново, 1971.

5. Корнюхин И.П., Жмакин Л.И., Козырев И.В. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2001, №4. С.83...88.

6. Корнюхин И.П., Савельев А.А. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1994, №4.

7. Теплоиспользующие установки в текстильной промышленности / Ганин Е.А., Корнеев С.Д., Корнюхин И.П. и др. – М.: Легпромбытиздат, 1989.

8. Берд Р., Стюарт В., Лайтфут Е. Явления переноса. – М.: Химия, 1974.

9. Корнюхин И.П., Савельев А.А., Чуркина Н.В. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1991, №4.

10. Корнюхин И.П., Жмакин Л.И., Козырева Л.И. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, №6. С.84...90.

11. Филоненко Г.К. Кинетика сушильных процессов. – М.: Оборонгиз, 1939.

12. Wadsworth P. // Journal of the Textile Institute. – v. 51, №9, 1960.

Рекомендована кафедрой промышленной теплоэнергетики. Поступила 10.10.02.