

УДК 677.057.135.2

**АНАЛИЗ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
СЕКЦИОННОЙ СУШИЛКИ***И.П. КОРНЮХИН, Л.И. ЖМАКИН, И.В. КОЗЫРЕВ***(Московский государственный текстильный университет им. А.Н. Косыгина)**

Ранее представлен метод расчета распределения присосов по длине сушилки [1]; выполнен анализ существующих методов расчета секционных машин и показано, что система уравнений должна быть замкнута при помощи уравнений тепловых и материальных балансов секций [2]. Такая задача была решена в [3]. Метод расчета сушилки в целом представлен в [4].

Проведенные расчеты позволяют проанализировать основные закономерности, выявить характерные черты, присущие процессам сушки в секционных сушилках и дать сравнительную оценку схемам с различными вариантами расположения точек отвода (сброса) воздуха из сушилки.

Результаты этих расчетов представлены ниже с помощью графиков, подразделяющихся на несколько вариантов, для каждого из которых приведено по 4 однотипных графика, отличающихся количеством и расположением точек сброса воздуха: в сушилке с двумя точками сброса воздухоотводящие короба располагаются посередине 2 и 6-й секциях; в сушилке с точкой сброса на входе ткани – посередине 2-й секции; на выходе ткани – посередине 6-й секции и в центре сушилки – посередине 4-й секции. На всех графиках по оси абсцисс отложена размерная координата (в метрах) по длине сушилки.

На графиках рис. 1...4 из [4] представлены кривые сушки и изменение скорости сушки по длине сушилки. В соответствии с введенным выше определением скорость сушки выражается как  $R_d = -dW/dX$ , так что отрицательные значения  $R_d$  характеризуют величину скорости конденсации.

Область больших отрицательных значений  $R_d$  на графиках не показана.

Изменение скорости сушки по длине описывается разрывной функцией, разрыв наблюдается на границах между секциями. Экспериментальные исследования процесса сушки обычно проводят при постоянных параметрах агента сушки – влажного воздуха. В этих условиях кривая сушки непрерывно переходит от начального участка (периода прогрева) к участку постоянной, а затем падающей скорости сушки. Причины появления таких разрывов в секционной сушилке будут проанализированы ниже.

Характерной чертой для всех рассмотренных вариантов сброса воздуха в сушилках (в дальнейшем будем рассматривать их как разные варианты сушилок) является то, что скорости сушки изменяются как в пределах одной секции, так и от секции к секции. При переходе от секции к секции скорость сушки скачком либо увеличивается, либо уменьшается. В последнем случае даже в некоторых промежуточных секциях (в общем случае различных в зависимости от варианта сушилки) может наблюдаться процесс конденсации влаги на материале.

Наиболее интенсивно конденсация протекает в первой по ходу ткани секции во всех вариантах сушилок за исключением сушилки с точкой сброса на входе ткани. В пределах каждой секции после изменений на входе в секцию значение скорости сушки стабилизируется.

Независимо от варианта сушилки в первой секции стабилизированное значение скорости сушки максимально. В по-

следней, седьмой, а в вариантах с двумя точками сброса и с точкой сброса на входе ткани (рис. 1 и 3 из [4]) также и в шестой секции, наблюдается уменьшение скорости сушки. Это явление связано с тем, что влагосодержание материала становится меньше максимального гигроскопического для процесса десорбции и из материала начинает удаляться гигроскопическая влага.

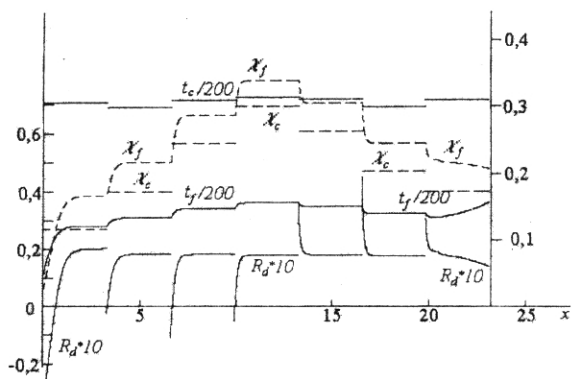


Рис. 1

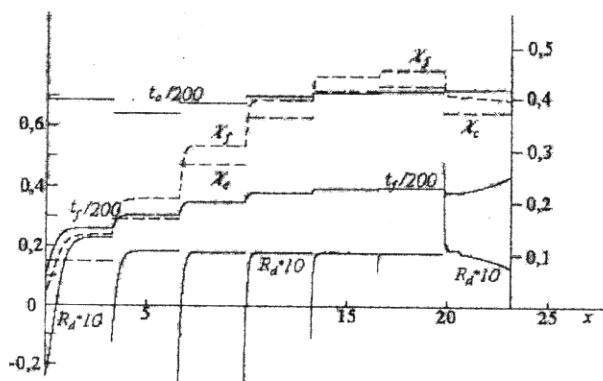


Рис. 2

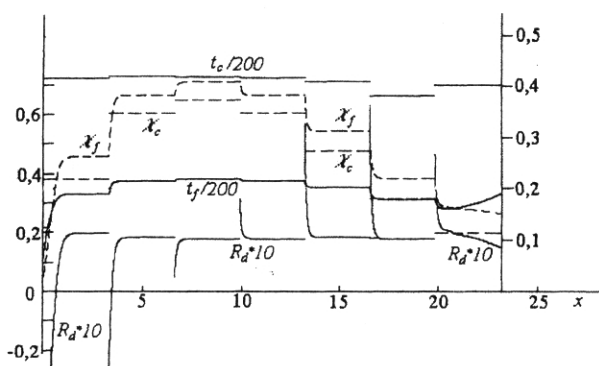


Рис. 3

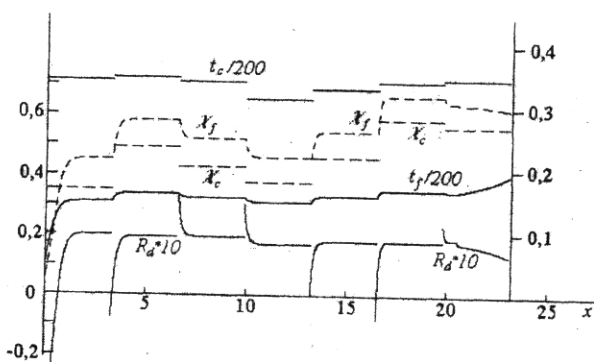


Рис. 4

На рис. 1...4 представлены графики изменения температуры  $t_c$  (в обозначениях [3]) в набегающем на ткань потоке воздуха, значения температуры ткани  $t_f$  и скорости сушки  $R_d$  для тех же режимов, что и на графиках рис. 1...4 из [4]. Величины этих параметров определяются по оси ординат, расположенной на графиках слева.

На этих же графиках штриховыми линиями представлено изменение молярной доли пара в потоке воздуха, набегающем на ткань  $\chi_c$ , а также равновесной моляр-

Поведение кривой сушки обусловлено закономерностями изменения скорости сушки. Во всех вариантах сушилок в пределах первой секции наблюдается максимум влагосодержания, обусловленный интенсивным процессом конденсации. На границах секций наблюдаются изломы кривой сушки, связанные со скачкообразным изменением скорости сушки.

ной доли пара на поверхности ткани  $\chi_f$ . Значения двух последних величин характеризуются осью ординат, расположенной на графиках справа. Значения  $t_c$  и  $\chi_c$  в набегающем на ткань потоке изменяются скачком при переходе от одной секции к другой, поскольку предполагается идеальное перемешивание в вентиляторах, подающих воздух через короба на ткань.

В то же время следовало ожидать, что в связи с инерционностью изменения характеристик ткани значения  $t_f$  и  $\chi_f$  на ее поверхности должны изменяться непрерыв-

но, что и подтверждается полученными зависимостями.

Согласно уравнениям (2), (4) из [4] знак производной  $dW/dX$ , а следовательно, и скорости сушки  $R_d$ , определяется непосредственно знаком разности величин молярных долей пара  $\chi_c - \chi_f$ . Там, где эта разность величин отрицательна, происходит испарение влаги из ткани; в противном случае наблюдается процесс конденсации влаги из воздуха на поверхности материала.

Наиболее четко на графиках видна область конденсации ( $\chi_c > \chi_f$ ) в первой секции для всех вариантов сушилок. В последней, седьмой, секции разность величин  $\chi_f - \chi_c$  уменьшается, что приводит к обсуждаемому выше уменьшению скорости сушки.

Разрывы кривой скорости сушки обусловлены скачкообразным изменением влагосодержания воздуха на границах секций. Для анализа этого явления были выполнены модельные расчеты, в которых искусственно предписывалось непрерывное линейное изменение влагосодержания

на границах между секциями в пределах участка, составляющего до 20% от длины секции. При этом разрывы кривой скорости сушки исчезли, на их месте появились максимумы и минимумы, причем при меньших длинах этого участка сохранялось явление конденсации влаги на ткани на границах между секциями. Этот анализ позволяет сделать вывод о том, что и в реальных условиях сушки скорость сушки на границах секций претерпевает изменения.

Характерным для всех представленных вариантов сушилок являются пониженные значения влагосодержаний в крайних секциях по сравнению с соседними. Этот факт согласуется с основанным на практических наблюдениях [5] утверждением о том, независимо от того, где располагается точка сброса воздуха – в начале или в конце сушилки – максимум влагосодержания наблюдается в ее средней части. Для того, чтобы проверить справедливость этого замечания в общем случае, в одном из вариантов рассматривался сброс воздуха в центре сушилки.

Таблица 1

Точка сброса в секциях	Номер секции						
	1	2	3	4	5	6	7
2 и 6-й	17,4	27,4	27,3	27,8	30,5	30,2	28,3
4-й	13,9	28,3	31,7	27,8	27,3	27,4	26,1
2-й	20,9	23,1	23,1	24,1	25,1	26,1	24,7
6-й	11,0	24,8	27,3	28,6	30,4	29,7	28,5

Полученные результаты (рис. 4, где наблюдаются два максимума величины  $\chi_c$ , связанной с влагосодержанием прямой зависимостью) позволяют обобщить вывод, сделанный в [5] следующим образом. Максимумы (или максимум) влагосодержания наблюдаются на удалении от крайних секций и от точки сброса воздуха. Заметим, что в крайние секции не поступает обогащенный влагой воздух из соседних секций. К тому же производительность крайних секций по испаренной влаге (г/с) меньше чем соседних, как можно судить по данным, приведенным в табл. 1.

В той секции (секциях), из которой сбрасывается воздух, максимален и рас-

ход присасываемого свежего воздуха с малым влагосодержанием, так что после смешения потоков максимум влагосодержания в этой секции не наблюдается.

Смешение с большим количеством свежего воздуха приводит к заметному понижению температуры воздуха перед калориферами, в результате чего их теплопроизводительность (МВт) в секциях со сбросом воздуха максимальна (табл. 2). По этой же причине температура  $t_c$  набегающего на ткань воздуха в такой секции ниже, чем в соседних (рис. 1...4).

Точка сброса в секциях	Номер секции						
	1	2	3	4	5	6	7
2 и 6-й	0,123	0,148	0,114	0,101	0,109	0,148	0,118
4-й	0,117	0,102	0,118	0,195	0,150	0,120	0,105
2-й	0,154	0,211	0,163	0,133	0,118	0,108	0,100
6-й	0,102	0,092	0,097	0,193	0,118	0,182	0,138

Конструкции двух вариантов сушилок с точками сброса воздуха на входе ткани (во 2-й секции) и на выходе ткани (в 6-й секции) зеркально симметричны. В связи с этим на первый взгляд представляется, что и зависимости изменения влагосодержаний и молярных долей пара по секциям сушилки должны быть зеркально симметричными. Однако если учесть направление движения ткани и характер изменения ее параметров, то ожидать симметрии уже не приходится.

Отсутствие симметрии относительно плоскости, проходящей через центр 4-й секции, наблюдается и для вариантов с двумя точками сброса и с точкой сброса в середине 4-й секции, хотя конструктивно эти сушилки обладают симметрией относительно этой плоскости.

В сушилке с точкой сброса во 2-й секции большая часть присасываемого воздуха перемещается внутри сушилки в направлении, противоположном направлению движения ткани. Такую схему приближенно можно рассматривать как про-

тивоточную. В свою очередь, сушилку с точкой сброса в 6-й секции можно уподобить прямоточной. Но если сравнить закономерности изменения влагосодержания воздуха в этих двух вариантах секционных сушилок с такими же закономерностями для строгих схем прямо- и противотока, изученных в [6] и [7], то обнаружим противоречие с такой классификацией схем.

Действительно, в сушилке с точкой сброса во второй секции величины молярной доли пара (рис.2) в большей части сушилки возрастают в направлении движения ткани. Возрастание влагосодержания воздуха в направлении движения ткани характерно для строгой прямоточной схемы [6] и [7] и с этой точки зрения рассмотренная секционная сушилка ближе к прямоточной схеме, а не к противоточной, как следует из рассмотрения направления движения большей части воздуха. В свою очередь, сушилка с точкой сброса в 6-й секции по закономерностям изменения молярной доли пара (рис. 3) ближе к противоточной схеме.

Таблица 3

Показатель	Положение точки сброса воздуха, секция			
	2 и 6-я	6-я	4-я	2-я
Скорость проводки ткани, м/мин	43,0	41,4	41,5	38,0
Теплота, подведенная в калориферах, МВт	0,867	0,831	0,907	0,988
Производительность по испаренной влаге, кг/ч	680	655	0,657	601
Расход пара, кг/ч	1496	1434	1566	1706
Удельный расход пара, кг пара/кг исп. влаги	2,20	2,19	2,38	2,84

Сопоставление различных схем организации движения воздуха в рассмотренных вариантах сушилок целесообразно провести на основе балансовых показателей. Такие показатели приведены в табл.3, причем во всех вариантах значения влагосодержаний ткани на входе и выходе, а также температура ткани на входе одинаковы и равны соответственно 0,84; 0,074 и 21°C.

Следует подчеркнуть, что рассчитанные и полученные при теплотехнических испытаниях [8] значения производительности по испаренной влаге  $G_B$  для базового варианта сушилки (с двумя точками сброса) совпадают во всех трех значащих цифрах, однако рассчитанный расход пара оказался завышенным примерно на 8% по сравнению с указанным в [8]. К сожалению

нию, в [8] не указано, как определялся этот расход. Учитывая, что точность испытаний в производственных условиях, как правило, низка, соответствие между расчетом и результатами испытаний можно считать приемлемым.

Несмотря на то, что в [8] не указано, в каких точках секции измерялась температура воздуха в секции и было ли исключено влияние присосов на показания приборов, все же целесообразно сопоставить результаты расчетов с измеренными величинами. Максимальное различие указанных температур в 10°C наблюдается в 1-й секции; в 4-й различие составляет 5°C; для остальных секций оно не превышает 2°C. В целом, соответствие результатов расчета с данными испытаний можно признать удовлетворительным.

При сопоставлении четырех вариантов сушилок, данные для которых представлены в табл. 3, варианты со сбросом воздуха во 2 и 4-й секциях сразу же отпадают, как худшие и по абсолютным и по удельным показателям. В вариантах с двумя точками сброса и с точкой сброса на выходе ткани удельный расход пара практически одинаков.

Благодаря большей скорости проводки ткани в первом из вариантов предпочтение следует отдать сушилке с двумя точками сброса (базовому варианту), хотя капитальные затраты в этой сушилке несколько выше (вместо одного сбросного вентилятора необходимо установить два с такой же суммарной производительностью).

## ВЫВОДЫ

1. Предложен новый метод поверочного теплотехнического расчета секционной сушилки, отличающийся от известных методов учетом

– распределения присасываемого воздуха по ее длине. Предложена математическая модель, позволившая рассчитать распределение присосов по секциям сушилки при заданном расположении точек сброса отработавшего воздуха;

– тепловых и материальных балансов всех элементов, включая калорифер, для

реального прототипа сушилки, состоящей из одинаковых секций;

– переноса теплоты и массы между секциями;

– локального термодинамического равновесия между влажным материалом и влажным воздухом на его поверхности.

2. Дан анализ физических закономерностей изменения параметров влажного материала в секционной сушилке и обосновано их отличие от известных закономерностей процесса сушки при постоянных параметрах агента сушки – влажного воздуха.

3. Сопоставление результатов расчета с результатами промышленных теплотехнических испытаний прототипа секционной сушилки продемонстрировало удовлетворительное соответствие, а сопоставление балансовых показателей четырех наиболее типичных схем расположения точек сброса отработавшего воздуха позволило рекомендовать оптимальный вариант.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Корнюхин И.П., Жмакин Л.И., Козырева Л.И. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2000, №3.
2. Корнюхин И.П., Жмакин Л.И., Козырев И.В. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2001, №3.
3. Корнюхин И.П., Жмакин Л.И., Козырев И.В. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2001, №4.
4. Корнюхин И.П., Жмакин Л.И., Козырев И.В. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2003, №1.
5. Бунин О.А., Малков Ю.А. Машины для сушки и термообработки ткани. – М.: Машиностроение, 1971.
6. Корнюхин И.П., Жмакин Л.И., Марюшин Л.А. // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1998, №1.
7. Корнюхин И.П., Жмакин Л.И. // Изв. Российской АН. – Энергетика, 1997, № 4.
8. Сравнительные испытания сушильно-ширильных машин фирм "Драберт", "Тексима" и марки СШЗ-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.

Рекомендована кафедрой промышленной теплоэнергетики. Поступила 10.10.02.