

## Паропроницаемость и теплообмен при фильтрационной сушке текстильных материалов

Ю.В.Светлов

*Российский заочный институт текстильной и легкой промышленности,  
Москва, Россия*

Массопроводность текстильных материалов, в частности, кож и тканей, в текстильном материаловедении в настоящее время принято оценивать такими характеристиками, как паропроницаемость  $A$  и постоянная паропроницаемости  $p$ . Их считают свойством материала и используют для оценки гигрофизических свойств материалов и текстильных изделий. Однако существующий метод определения этих величин через коэффициенты массоотдачи  $\beta$  и массопередачи  $K_m$  по аналогии с процессом теплопередачи через стенку приводит к кинетическому уравнению, выражающему, по существу, удельный массовый поток  $m$ , кг/(м<sup>2</sup>·с):  $A = \Delta M / F \cdot \Delta \tau = K_m (P_{ст.} - P_{эк.}) = m$ , где  $(P_{ст.} - P_{эк.})$  – движущая сила массопередачи, выраженная через разность парциальных давлений паров влаги в воздушных средах стакана с образцом и эксикатора, мм рт.ст.;  $K_m = 1 / (1/\beta_1 + \delta/\lambda_m + 1/\beta_2)$ , кг/(м<sup>2</sup>·с·мм рт.ст.). Как видно, величина  $K_m$  зависит не только от свойств материала, но и ряда внешних факторов – скорости и режима движения воздуха, его температуры и относительной влажности; формы, размеров и толщины образца, видом отделки поверхности и т.п. Этим и объясняется непредсказуемость истинных значений паропроницаемости материалов при их практическом использовании и значительные ошибки при сертификации текстильных материалов и изделий. Таким образом, паропроницаемость – это характеристика процесса, а не материала.

Наши исследования показали, что в качестве гигрофизической характеристики материала следует использовать коэффициент массопроводности (влагопроводности)  $\lambda_m$ . В условиях эксплуатации параметры окружающего воздуха не поддаются управлению, в то время как гидросопротивление кож  $\delta/\lambda_m$  можно регулировать за счет изменения как  $\delta$ , так и  $\lambda_m$  на стадии проектирования изделий для той или иной климатической зоны. Однако, для обеспечения гигрокомфортных условий эксплуатации изделий (особенно обуви) очень важен расчет сорбционной ёмкости материала изделия. В качестве такой гигрофизической характеристики кож с различными толщинами  $\delta$ , плотностями  $\rho$  и значениями удельной влагоёмкости  $c_m$  рекомендуется универсальный обобщенный параметр – сорбционная ёмкость материала (изделия)  $C_m = c_m \delta \rho$ . С его помощью можно оценить и сопоставить гигиенические характеристики кож и других используемых материалов различных природных свойств и толщины.

Для сушки тканей весьма эффективным является процесс фильтрационной сушки. Но ткань является пористой системой, образованной из прядей и волокон, и имеет внутреннюю поверхность, которая в десятки – сотни раз выше внешней. Очевидно, если воздух направить через ткань между прядями и волокнами, то потоки теплоты и паров влаги должны возрасти во столько раз, во сколько внутренняя поверхность (фильтрационная  $F_\phi$ ) больше наружной:  $Q_\phi = (\lambda/d_s) \cdot \Delta T \cdot F_\phi$ ;  $M_\phi = (\lambda_m/d_s) \cdot \Delta P \cdot F_\phi$ .

На данном этапе неизвестны как значения внутренней поверхности тканей  $F_\phi$ , так и среднее значение размеров прядей и волокон (речь идет о какой-то условно-средней их величине), но тем не менее известны их порядки, и это является основанием для прове-

дения экспериментальных работ в данном направлении. Уместно использование эквивалентного диаметра  $d_3$ , как это принято в работах по исследованию гидродинамики и теплообмена дисперсных сред.

Пропустив воздух через слой ткани, т.е. организовав фильтрационное движение воздуха через ткань, и этим самым обеспечив контакт воздуха с внутренней поверхностью, можно интенсифицировать процессы переноса, т.е. сушку в первом периоде, в десятки раз. Помимо этого, интенсификация процесса возникает также за счет увеличения скорости фильтрации воздуха в малых каналах ткани, что ведет к росту коэффициентов теплоотдачи  $\alpha$  и массоотдачи  $\beta$ . Исходя из критериальных уравнений тепло- и массоотдачи, этот процесс в каналах можно представить следующими зависимостями:

$$\alpha = V_T \cdot \lambda_B \cdot (w^{0,8} v_B^{0,2} / d_3^{0,2}), \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{К}); \quad \beta = V_m \cdot \lambda_{mB} \cdot (w^{0,8} v_B^{0,2} / d_3^{0,2}), \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{ед.П}).$$

Учитывая реальные значения свободного объема (пустот) ткани  $\varepsilon = 0,3 - 0,7$ , можно считать, что скорость воздуха через ткань, т.е. скорость фильтрации, возрастет примерно в 1,5-3 раза. Если учесть, что размеры каналов (капилляров ткани) в эквивалентном исчислении сокращаются в несколько десятков раз, то величины коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , а следовательно и интенсивность сушки, дополнительно возрастают в два-четыре раза.

В указанных выше тепло-массофизических процессах удаления влаги в условиях способа фильтрационной сушки, происходит также механическое удаление свободной влаги из ткани в первоначальный момент сушки. Этот процесс осуществляется вытеснением капельной влаги из пор ткани (свободного объема) потоком воздуха. Очевидно, чем выше его скорость, тем эффективнее процесс сушки. Интенсификация конвективной сушки за счет использования фильтрационного движения сушильного агента в проницаемом материале является в настоящее время весьма актуальным, но мало изученным направлением. Наложение такого рода движения со значительным кинетическим импульсом на капиллярно-диффузионный перенос влаги приводит к принципиальным изменениям в механизме тепловлагопереноса и, как следствие, к высокоинтенсивному (скоростному) процессу сушки.

Принципиальный подход к математическому анализу данной задачи показан А.В.Лыковым [1] применительно к неограниченной пластине. Он базируется на системе дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса с использованием ряда специфических критериев и параметрических обобщенных функций: градиентов потенциалов температуры  $t$ , влагопереноса  $\theta$  и давления пара  $P$ , относительно которых, в итоге, ищется решение исходной системы уравнений.

Сформируем систему уравнений тепло- и массообмена применительно к нашей задаче. Поскольку эти процессы органически взаимосвязаны, рассматриваем их как единый комплексный процесс, протекающий не только в одинарном текстильном материале (кожа, ткань), но и в пакетах материалов. Итак, на основании законов сохранения массы и энергии процесс переноса влаги и теплоты можно описать следующими дифференциальными уравнениями:

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} = a_m (\nabla^2 \omega_2 + \delta_T \nabla^2 t) + \frac{\varepsilon_{II}}{1 - \varepsilon_{II}} \cdot \frac{\partial \omega_2}{\partial \tau} + \frac{K_{\Phi}}{\rho_{II}} \cdot \text{grad } P \cdot \text{grad } \omega,$$

$$c \rho_0 \frac{\partial t}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 t + r_{12} \cdot J_{12} + r_{23} \frac{\varepsilon_{II}}{1 - \varepsilon_{II}} \cdot \frac{\partial \omega_2}{\partial \tau} + c_p \cdot K_{\Phi} \cdot \text{grad } P \cdot \text{grad } t,$$

где  $\omega$  – объемная концентрация влаги, равная сумме объемных концентраций влаги в виде пара  $\omega_1$ , жидкости  $\omega_2$  и льда  $\omega_3$ ;  $a_m$  – коэффициент теплопроводности (массо-проводности), равный сумме коэффициентов теплопроводности парообразной  $a_{m1}$  и жидкой  $a_{m2}$  влаги;  $\delta_\tau$  – суммарный термоградиентный коэффициент, определяемый из соотношения:  $\delta_\tau = (a_{m1}\delta_{\tau1} - a_{m2}\delta_{\tau2})/(a_{m1} + a_{m2})$ , где  $\delta_{\tau1}$  и  $\delta_{\tau2}$  – соответственно термоградиентные коэффициенты парообразной и жидкой влаги;  $\varepsilon_\pi$  – коэффициент льдистости, определяемый как отношение массы льда к массе всей влаги  $\varepsilon_\pi = \omega_3/\omega$ ;  $K_\phi$  – коэффициент фильтрации через пористое тело,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{мм рт.ст.})$ ;  $\rho_\pi$  – плотность пара,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $P$  – общее давление,  $\text{мм рт.ст.}$ ;  $c$  – приведенная удельная теплоемкость тела,  $c = c_0 + \sum c_i \cdot \omega_i \cdot 1/\rho_0$ , где индекс «0» обозначает абсолютно сухое тело;  $r_{12} = r_{21}$  – удельная теплота конденсации или испарения;  $r_{23} = r_{32}$  – удельная теплота замерзания воды или плавления льда;  $J_{12}$  – объемная мощность источника или стока влаги,  $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$ . Здесь индексы показывают: 1 – состояние пара, 2 – жидкую фазу, 3 – твердую. Двойной индекс обозначает соответствующий переход из одного состояния в другое.

В первом уравнении изменения объемной концентрации влаги первый член  $a_m (\nabla^2 \omega_2 + \delta_\tau \nabla^2 t)$  описывает перенос пара жидкости под влиянием градиентов концентрации и температуры, второй член  $[\varepsilon_\pi/(1 - \varepsilon_\pi)] \cdot (\partial \omega_2 / \partial \tau)$  показывает изменение жидкой фазы за счет фазовых превращений, и третий член  $(K_\phi/\rho_\pi) \cdot \text{grad } P \cdot \text{grad } \omega$  описывает процесс фильтрации пара. Уравнение переноса влаги справедливо только в гигроскопической области, когда парциальное давление пара является функцией равновесной концентрации влаги и температуры:  $P_{10} = f(\omega_2, t)$ .

Изменение объемной энтальпии в единицу времени (2-е уравнение) равно сумме потоков теплоты теплопроводностью  $\lambda \cdot \nabla^2 t$ , источников и стоков  $r_{12} \cdot J_{12} = r_{12} \varepsilon \cdot (\partial \omega / \partial \tau)$ ;  $r_{23} \cdot [\varepsilon_\pi/(1 - \varepsilon_\pi)] \cdot (\partial \omega_2 / \partial \tau)$  и конвекцией за счет фильтрационного движения  $c_p \cdot K_\phi \cdot \text{grad } P \cdot \text{grad } t$ .

Приведенные уравнения применимы только для однородного тела. Для системы, состоящей из нескольких тел, имеет место скачок концентрации влаги на границе тел, т.к. концентрация не является потенциалом переноса. Тем не менее, связь между ними имеется. Потенциал переноса влаги в неоднородном теле  $\theta$  связан с концентрацией влаги следующим соотношением:  $\omega_2 = c_m \rho_0 \Pi$ , где  $c_m$  – средняя удельная массоемкость тела,  $\text{кг}/(\text{кг} \cdot \text{ед.П.})$ . Тогда уравнения переноса теплоты и массы могут быть представлены в следующем виде:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{r_{12}}{c \rho_0} J_{12} + \frac{r_{23}}{c} \cdot \frac{\varepsilon_\pi}{1 - \varepsilon_\pi} c_m \frac{\partial \Pi}{\partial \tau} + \frac{c_p K_\phi}{c \rho_0} \text{grad } P \cdot \text{grad } t;$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \tau} = a_{m2} \nabla^2 \Pi + \frac{1}{c_m \rho_0} J_{12} + \frac{\varepsilon_\pi}{1 - \varepsilon_\pi} c_m \rho_0 \frac{\partial \Pi}{\partial \tau}$$

Данная система уравнений может быть решена в общем виде только при целом ряде допущений. Однако, из нее можно получить основные критерии тепловлагообмена: критерий гомохронности Фурье  $Fo = a \tau / \ell^2$ ; критерий инерционности поля влажности по отношению к полю температур (критерий Лыкова)  $Lu = a_m/a$  (или  $Lu = a_{m2}/a$ ); критерий инерционности поля парциальных давлений по отношению к полю температур  $Lu_p = D_1/a$  (его можно охарактеризовать еще как фильтрационный критерий, показывающий интенсивность распространения поля давления при фильтрационном движении по отношению к развитию поля температур). Фильтрационный критерий  $Lu_p$  зна-

чительно больше единицы – порядка 100...1000, поэтому релаксация общего давления парогазовой смеси в капиллярно-пористых телах происходит на 2...3 порядка быстрее по сравнению с релаксацией поля температур [1]. В этой системе уравнений также присутствуют: критерий Коссовича, равный отношению количества теплоты, затраченной на фазовый переход, к количеству теплоты, затраченной на нагревание,  $Ko_{ik} = r_{ik}\omega_k / (c \cdot \Delta t p_0) = r_{ik}\Delta u_{ik}/(c\Delta t_{ik})$ ; критерий Поснова, равный отношению перепада объемной концентрации влаги, вызванного перепадом температуры, к общему перепаду объемной концентрации влаги  $Pn = \delta_t \Delta t / \Delta \omega$ ; критерий фазового превращения  $\varepsilon$ , являющийся мерой переноса парообразной влаги по сравнению с суммарным переносом влаги  $\varepsilon = a_{m1}/(a_{m1} + a_{m2})$ ; критерий источника парообразной влаги, равный отношению количества пара, полученного путем испарения жидкости, к общему количеству диффундирующего пара,  $Ku = (J_2 \mu_c \ell^2)/(D_1 \rho_c \mu_c \cdot \Delta P^{H_{10}})$ , где  $P^{H_{10}}$  – начальное относительное парциальное давление пара; критерий фильтрационного переноса влаги, характеризующий интенсивность фильтрационного переноса по сравнению с диффузионным  $Ku_{\phi} = (K_{\phi} P) / (\rho_1 D_1)$ . Из граничных условий получаются тепловой и массообменный критерии Био:  $Bi = \alpha \ell / \lambda$ ;  $Bi_m = \beta \ell / \lambda_m$ .

Таким образом, на основании второй теоремы подобия полученная система уравнений может быть представлена в виде зависимости между критериями подобия. Обработка экспериментальных результатов в критериальном виде позволяет вполне обоснованно перенести данные, полученные на модели, на натуральный процесс. Однако, имеющихся в настоящее время опытных данных для этого явно недостаточно. Поэтому, исследования по определению тепловлагодобменных характеристик  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\lambda$ ,  $\lambda_m$ ,  $c$ ,  $c_m$ ,  $a$ ,  $a_m$ ,  $\delta_t$ , метода определения потенциалов переноса, а также по установлению границ возможного изменения используемых критериев, являются весьма актуальными.

Экспериментальное определение основных тепло-массообменных коэффициентов, устанавливаемое большинством современных методик, осложнено измерением потенциала переноса (температуры, равновесного парциального давления, концентрации) на поверхности твердого тела. Особенно затруднительно это для текстильных материалов, имеющих мягкую пористую, а зачастую и ворсистую поверхность [2]. Аналитический анализ показал, что указанной трудности можно избежать, применив метод определения локального коэффициента переноса (тепло- или массоотдачи, тепло- или массопроводности) по доле от общего коэффициента переноса рассматриваемого процесса. Покажем это на примере определения коэффициентов массоотдачи  $\beta$  и массопроводности  $\lambda_m$ . В теоретическом плане кинетический закон массоотдачи (конвективной диффузии) является основой для самого простого способа определения экспериментальных значений  $\beta$ . Однако на практике он трудно выполним, а порой и неосуществим, по указанной выше причине.

Рассмотрим стационарный процесс массопередачи диффундирующего вещества в однородных средах, которые разделены между собой проницаемой твердой стенкой. Величина потока диффундирующего вещества  $M_1$  описывается уравнением массопередачи:  $M_1 = K_m \cdot \Delta F = \Delta F / (1/\beta_1 + \delta/\lambda_m + 1/\beta_2)$ .

Используем второй стационарный процесс массопередачи, который будет отличаться от первого всего лишь скоростью движения второй среды  $w_2$ . Очевидно, при этом произойдет изменение коэффициента массоотдачи среды и ее диффузионного сопротивления переносу, а также общего коэффициента массопередачи. Проведя ряд преобразований, получили отношение движущих сил (ДС) конвективной диффузии второй среды

$\Delta\beta_2$  к общей ДС данного процесса переноса массы  $\Delta$ :  $D_1 = \Delta\beta_2/\Delta = (M_1 - M_2)/\{M_2[(w_1/w_2)^n - 1]\}$ ,

где  $M_1$  и  $M_2$  – потоки диффундирующего вещества соответственно при скоростях  $w_1$  и  $w_2$ . Движению второй среды со скоростью  $w_2$  будет соответствовать своя доля  $D_2$ , движущая сила массоотдачи  $\Delta'\beta_2 = D_2 \cdot \Delta$  и уравнение массоотдачи  $M_2 = \beta_2' \cdot D_2 \Delta F$ . В итоге получаем:  $\beta_2 = 1/(D_1 \cdot K_m)$ , т.е. кинетический закон массоотдачи, в котором ДС выражена долей от общей ДС массопередачи, точно и просто измеряемой в опыте.

Аналогичный подход использован для определения коэффициента массопроводности. Рассматриваем два стационарных процесса массопередачи диффундирующего вещества из одной среды в другую той же природы через плоские перегородки из исследуемого материала равной поверхности  $F$ , но имеющих различную толщину  $\delta_1$  и  $\delta_2$ . Процессы протекают в изотермических условиях с равными движущимися силами массопередачи  $\Delta = \text{idem}$  и с равными внешними условиями переноса:  $1/\beta_1 + 1/\beta_2 = \Sigma 1/\beta = \text{idem}$ . Очевидно, что при принятых условиях величины потоков  $M_1$ ,  $M_2$  диффундирующего вещества различны и их значения описываются зависимостями на основе уравнений массопередачи.

Совместное решение этих уравнений при условии  $\delta_1/\lambda_m = \text{const}$  и  $\delta_2/\lambda_m = \text{const}$  приводит к определенному соотношению между суммарным диффузионным сопротивлением конвективных переносов и диффузионным сопротивлением образца толщиной  $\delta_1$  при соответствующих потоках диффундирующего вещества  $M_1$  и  $M_2$  с учетом величины отношения толщин  $a$ :  $\Sigma (1/\beta) = [a(M_1 - M_2) \delta_1] / (M_1 - M_2)\lambda_m$ . В итоге получаем расчетную зависимость для определения коэффициента массопроводности исследуемого материала:  $\lambda_m = \{ [a(M_2 - M_1)/(M_1 - M_2)] + 1 \} \cdot M_1 \delta_1 / (\Delta F)$ .

Таким образом, изложенный метод на основе достаточно легко и точно измеряемых в опыте величин:  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  и  $\Delta$ , как следствие, дает новые свойства и возможности: высокая точность рассчитываемых кинетических коэффициентов переноса; исключение травматичности исследуемого образца материала, т.к. нет необходимости установки датчиков на его поверхности; сопоставимость результатов исследования различных материалов; оценка влияния состояния поверхности материалов, их внутренней структуры и других геометрических и режимных факторов; значительное сокращение времени эксперимента, что открывает широкие возможности для исследования разнообразных материалов.

Для определения потенциалов переноса и удельной массоемкости тел капиллярно-пористой структуры используем метод, основанный на следующих соображениях. Известно, что при длительном пребывании материала в воздухе с постоянными параметрами устанавливается термодинамическое равновесие между материалом и воздухом. Температура материала становится равной температуре воздуха, а давление пара в воздухе – равным давлению пара над материалом, т.е.  $P_n = P_m$ . Это означает, что относительная влажность воздуха  $\phi_v = P_n/P_n$  будет равна относительной упругости пара материала  $\phi_m = P_m/P_j$ , где  $P_n = P_j$  – давление насыщенного пара жидкости. Изменяя давление пара в окружающем воздухе, можно получить зависимость между давлением пара и содержанием влаги в материале в виде кривой, называемой изотермой. Если в воздухе определенных параметров будет находиться несколько различных материалов, то через определенный промежуток времени установится термодинамическое равновесие между материалом и воздухом, а также и между различными материалами. Температу-

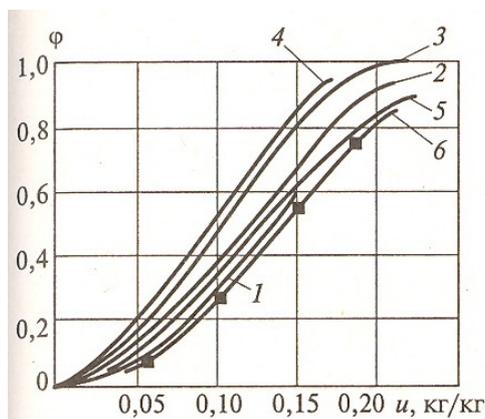
ры тел и давление пара над поверхностью материала будут одинаковы. Тогда можно сказать, что в данных условиях потенциалы этих тел одинаковы. Если одно из этих тел – эталонное, с известной (принятой) массоемкостью, то не представит труда определить значение потенциала по массосодержанию эталонного тела.

Для удобства сравнения с данными, полученными методом контакта двух тел, примем в качестве эталона целлюлозу (фильтровальную бумагу), для которой массоемкость в соответствии с рекомендациями А.В.Лыкова [1], принимается равной 1/100 максимального сорбционного (гигроскопического) массосодержания (при  $\varphi = 100\%$  по изотерме). Тогда  $c_{m \text{ эт}} = u_{\text{эт.г}}/100$ . Например, при  $t = 22^\circ\text{C}$  для фильтровальной бумаги  $u_{\text{г}} = 0,267$  (26,7%). Потенциал переноса (по А.В.Лыкову) вещества (эталона и образца) будет  $\theta = u_{\text{эт}}/c_{m \text{ эт}} = 100 u_{\text{эт}}/u_{\text{эт.г.}}$ , где  $u_{\text{эт}}$  – массосодержание эталона.

Предлагаемый метод определения потенциала и массоемкости, используя изотермы сорбции и десорбции, позволяет определить коэффициенты переноса в широком диапазоне влажности. В области гигроскопического влагосодержания материала значение его паросодержания, по аналогии с тепловыми процессами, можно выразить через удельную массоемкость (пароемкость) и влаготенциал:  $u = c_m \cdot P_{\text{п}}$ , кг/кг, где  $c_m$  – удельная массоемкость материала, кг/(кг · мм рт.ст.);  $P_{\text{п}}$  – влаготенциал, выраженный через равновесное парциальное давление паров влаги в воздухе, мм рт.ст.

Исходя из этого выражения, приращение влагосодержания можно представить как  $\Delta u = c_m \cdot \Delta P_{\text{п}}$ , откуда  $c_m = \Delta u / \Delta P_{\text{п}}$ .

Необходимые приращения  $\Delta u$  и  $\Delta P_{\text{п}}$  определяют по опытным изотермам сорбции – десорбции. Величину  $\Delta P_{\text{п}}$  рассчитывают, принимая во внимание соответствующее приращение относительной влажности:  $\Delta P_{\text{п}} = \Delta \varphi \cdot P_{\text{п}}$ , где  $P_{\text{п}}$  – давление насыщения паров влаги при постоянстве данной температуры, мм рт.ст.



Фиг.1. Изотермы сорбции шерстяных тканей:

- шерстяная ткань арт.272 по данным [3]: 1 –  $t = 20^\circ\text{C}$ , 2 –  $t = 60^\circ\text{C}$ , 3 –  $t = 80^\circ\text{C}$ , 4 –  $t = 95^\circ\text{C}$ ;
- 5 – шерстяная ткань по данным [4];
- шерстяная ткань, арт.528 (контр. опыт).

На фиг.1 представлены изотермы сорбции шерстяной ткани других исследователей, а также контрольная изотерма, полученная в нашей работе для ткани с близкими характеристиками (арт. 528), табл.1, при  $t = 20^\circ\text{C}$ . Изотермы имеют типичный вид s-образных кривых с явно выраженными тремя участками, отличающимися темпом приращения

величины  $\Delta u$ : первый участок с диапазоном изменения относительной влажности от 0 до 0,2; второй – от 0,2 до 0,8 и третий – от 0,8 до 1. Очевидно, первый участок соответствует доминирующей мономолекулярной сорбции, второй – полимолекулярной и третий – капиллярной. Значения средних удельных массоемкостей по участкам изотермы представлены в таблице 1.

Средние значения удельной массоемкости

Таблица 1

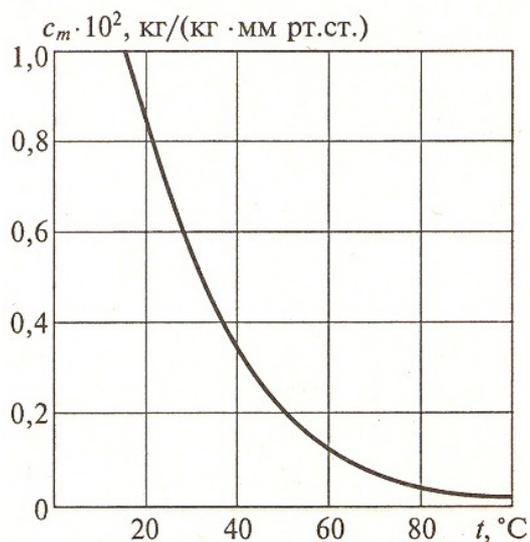
Материал	t, °C	$P_n$ , мм рт.ст.	$\Delta\phi$	$\Delta P_n$ , мм рт.ст.	$\Delta u$ , кг/кг	$c_m \cdot 10^2$ , кг/(кг·мм рт.ст.)
Шерстяная ткань, артикул 272 [3]	20	17,54	0 ÷ 0,2	3,510	0,079	2,250
		17,54	0,2 ÷ 0,8	10,530	0,096	0,914
		17,54	0,8 ÷ 1	3,510	0,135	3,850
	60	149,4	0,2 ÷ 0,8	89,640	0,108	0,120
	80	355,1	0 ÷ 0,2	71,020	0,054	0,076
		355,1	0,2 ÷ 0,8	213,060	0,096	0,045
		355,1	0,8 ÷ 1	71,020	0,075	0,105
	95	633,9	0,2 ÷ 0,8	380,340	0,093	0,024
	Шерстяная ткань [4]	20	17,54	0,2 ÷ 0,8	10,530	0,119
Шерстяная ткань, артикул 528	20	17,54	0,25 ÷ 0,55	5,26	0,050	0,950

Влияние температуры на удельную массоемкость, описываемое уравнением  $c_m = f(t)$ , выражается кривой, фиг.2.

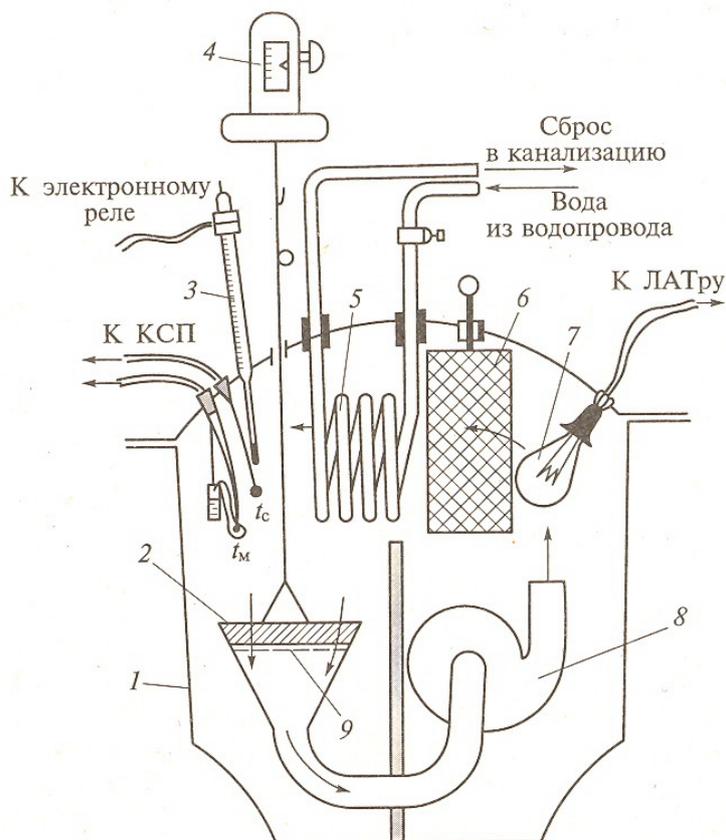
Как и следовало ожидать, удельные массоемкости первого участка – мономолекулярной сорбции, и третьего – капиллярной сорбции, значительно превосходят значение  $c_m$  для полимолекулярной сорбции второго участка. Однако, по мере повышения температуры влажной шерстяной ткани это отличие уменьшается. Данные таблицы 1 показывают также, что повышение температуры ведет к снижению абсолютного значения удельной массоемкости, которое иллюстрируется кривой на фиг.2. По мере повышения температуры степень ее влияния на величину  $c_m$  снижается, и кривая асимптотически стремится к оси абсцисс.

Экспериментальная установка для снятия изотерм сорбции и десорбции путем организации сквозного просасывания (методом фильтрационного движения воздуха) представляет собой термо-гигростатированную емкость – эксикатор 1, в которой размещен исследуемый образец ткани 2. Просасывание влажного воздуха через образец производится вентилятором 8. Образец ткани укладывается на сетку 9 всасывающего раструба вентилятора. Для поддержания необходимой относительной влажности воздуха в эксикаторе расположен увлажнитель – осушитель 6, а для поддержания его температуры встроен ламповый нагреватель 7 и холодильник 5. Замер температуры и относительной

влажности воздуха осуществляется терморезисторами  $t_c$  и  $t_m$  (температуры сухого и мокрого термометров). Включение и поддержание заданной температуры воздуха в эксикаторе осуществляется электроконтактным термометром 3 и электронным реле. Замер массы влажного образца производится торсионными весами 4.



Фиг.2. Зависимость средней удельной массоемкости шерстяной ткани от температуры в области полимолекулярной сорбции.



Фиг.3. Схема экспериментальной установки для определения изотерм сорбции и десорбции паров влаги шерстяной тканью.

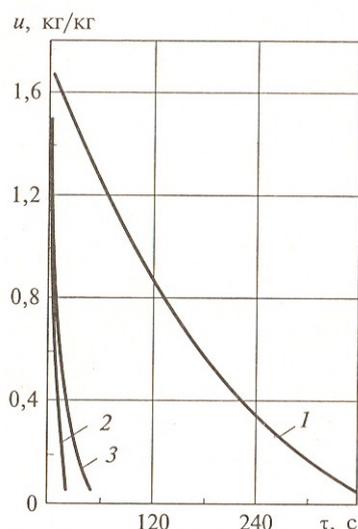
Фильтрационная сушка или скоростная сушка сквозным просасыванием (ССП) воздуха через ткань отличается от классической прежде всего тем, что в ней возникает «нулевой» период, соответствующий механическому выдуванию свободной влаги из сквозных пор материала. В зависимости от гидродинамического и теплового режимов, доля свободной влаги, удаляемая в нулевом периоде, может достигать ста процентов. Таким образом, в зависимости от режима процесса, скоростная сушка может состоять из нулевого, первого и второго периодов. Нулевой период длится в пределах от одной до нескольких секунд. Следующее отличие, определяющее рост как теплового, так и массообменного потоков, заключается в величине поверхности  $F$ , обтекаемой воздушным потоком. Даже при относительно небольших скоростях воздуха, протекающего через сквозные поры, и омывающего отдельные волокна ткани, величина поверхности теплообмена возрастает в несколько раз. При более высоких скоростях наступает фильтрация воздуха через межволоконное пространство. Чем выше скорость, тем большее число отдельных волокон омывается воздухом, т.е. возрастает поверхность теплообмена, достигая кратности в несколько десятков раз. Рост теплообменных потоков происходит также за счет увеличения коэффициентов тепло- и массоотдачи, снижения термического сопротивления теплопроводности и диффузионного сопротивления массопроводности в связи с уменьшением определяющего размера – им становится размер волокон.

В первом периоде «классической» конвективной сушки поверхностью теплообмена  $F$  являются две поверхности материала, а путь переноса непосредственно в ткани составляет половину ее толщины  $\delta/2$ . Так как свободная капельная влага испаряется с поверхности, то термическим сопротивлением теплопроводности можно пренебречь:  $1/\alpha \gg \delta/2\lambda$ , а тепловой поток, обеспечивающий подвод теплоты на сушку, определяется только теплоотдачей. Диффузионное сопротивление массопроводности капельной влаги в ткани на два-три порядка ниже диффузионного сопротивления массоотдачи паров влаги:  $1/\beta \gg \delta/2\lambda_m$ , следовательно, процесс обезвоживания ткани определяется только конвективной диффузией. Первый период протекает при постоянной скорости сушки:  $M = \text{const}$ ,  $Q = \text{const}$ . Второй период наступает после того, как на поверхности влажной ткани достигается максимальное значение гигроскопического влагосодержания. Этот момент соответствует началу транспортирования гигроскопической влаги из ткани в виде паров. Коэффициент массопроводности паров влаги в ткани имеет значение на два-три порядка ниже коэффициента массопроводности капельной влаги, при этом, диффузионное сопротивление массопроводности паров влаги уже становится соизмеримым с диффузионным сопротивлением массоотдачи. По мере углубления гигроскопического влагосодержания в толще ткани величина пути переноса возрастает, что ведет к росту диффузионного сопротивления и снижению скорости сушки.

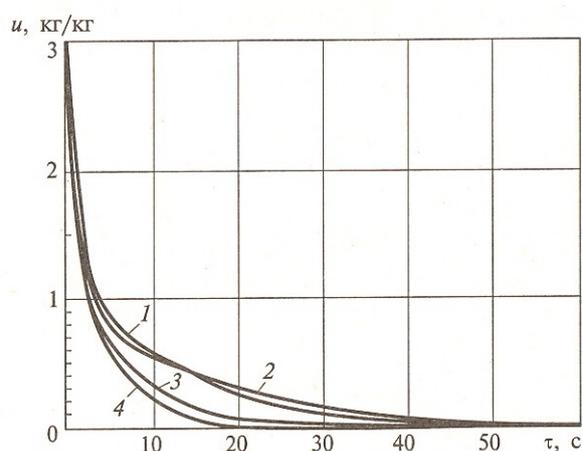
Проведем сопоставление времени сушки тканей, полученных классическим конвективным способом и методом фильтрационной сушки – скоростным сквозным просасыванием (ССП). Для этого была создана установка, где предусмотрен широкий диапазон изменения скорости, отнесенной к сечению цилиндра, на котором размещена перфорированная пластина с исследуемым образцом ткани, и температур:  $w = 0,2-6$  м/с;  $t = 20-100^\circ\text{C}$  [2]. Данная установка является универсальной, позволяющей проводить опыты сушки конвективным методом, сквозным просасыванием с неподвижным образцом и с перемещающейся лентой из ткани. Экспериментальные данные представлены кривыми сушки двух тканей на фиг.4. Как видно, интенсивность сушки, а следовательно, и время процесса при равных температурах воздуха одной и той же ткани – сукно  $\delta = 0,68$  мм, артикул Н-2806 – весьма различны при различных способах сушки. При конвективной

сушке влагосодержание указанной ткани за время процесса 360 секунд снизилось до значения  $u = 0,07$  кг/кг (кривая 1). Этого же влагосодержания ткань при фильтрационной сушке достигает менее, чем за 10 секунд (!). Для сопоставления результатов на фиг.4 представлена кривая сушки «тяжелой» ткани  $\delta = 2,5$  мм, артикул 6425 – сукно огнестойкое с пропиткой. Ее плотность и толщина более чем в три раза выше ранее рассмотренной, а процесс, проведенный методом фильтрационной сушки, протекал при более низкой температуре воздуха  $t = 36,5^\circ\text{C}$ . Тем не менее, эффективность метода сказалась и в этом случае. Значение влагосодержания  $u = 0,07$  кг/кг достигнуто за время сушки 36 секунд.

Обращает на себя внимание факт некоторого увеличения первого периода в условиях сушки методом сквозного просасывания. Из кривых сушки на фиг.4 следует, что при классическом способе сушки переход от первого периода ко второму (кривая 1) происходит при влагосодержании  $u_{кр} \approx 0,8$  кг/кг. В то же время, критическое влагосодержание при сушке этой ткани методом сквозного просасывания снижается до значения  $u_{кр} = 0,2-0,25$  кг/кг (кривая 2). А критическое влагосодержание более плотной ткани (арт.6425) не превышает значения  $u = 0,4-0,5$  кг/кг (кривая 3).



Фиг.4. Сравнение эффективности методов сушки тканей: 1 – конвективная сушка, ткань полушерстяная, арт.Н-2806,  $\delta=0,68$  мм,  $t_1= 50^\circ\text{C}$ ; 2 – фильтрационная сушка, ткань та же,  $t_2= 50^\circ\text{C}$ ; 3 – фильтрационная сушка, сукно огнестойкое с пропиткой, арт.6425,  $\delta=2,5$  мм,  $t_3= 36,5^\circ\text{C}$ .



Фиг.5. Сравнительная характеристика результатов по механическому вытеснению влаги в первый период фильтрационной сушки тканей: 1,4 – ткань «Газон», арт.Н-175Р,  $\delta=1,32$  мм,  $t_1= 26^\circ\text{C}$ ,  $t_4= 51^\circ\text{C}$ ; 2,3 – сукно огнестойкое, арт.6425,  $\delta=2,5$  мм,  $t_2= 36,5^\circ\text{C}$ ,  $t_3= 99,5^\circ\text{C}$ .

Метод фильтрационной сушки привлекает внимание также тем, что в нем можно совместить одновременно два процесса: удаление избыточной (свободной) влаги механическим вытеснением ее при прохождении воздуха через поры ткани и удаление связанной влаги при тепло-массообмене. Как видно из фиг.5, опыты проведены с начальным влагосодержанием от 2,5 до 3 кг/кг, которое соответствует наличию свободной, практически несвязанной с тканью, влаги. В процессе сушки методом фильтрации более двух третей всей влаги удаляется из ткани за очень малый промежуток времени практически механическим «выдуванием». Надо полагать, что интенсивность этого процесса зависит от параметров воздуха и природы тканей.

На фиг.5 представлены результаты по механическому вытеснению влаги при сушке «тяжелых» тканей. Кривые 1 и 4 получены при сушке ткани «Газон», арт.Н-175-Р, а кривые 2 и 3 соответствуют сушке огнестойкого сукна,  $\delta = 2,5$  мм, арт.6425. Как следует из графиков, по истечении пяти секунд процесса уже протекает первый период сушки, т.е. механическое удаление влаги протекает за время не более, чем 1-3 секунды при общем времени процесса 30-50 секунд. Из опытных данных также следует, что существующее отличие зависимостей времени механического удаления влаги от температуры для одной и той же ткани по отношению к общему времени невелико.

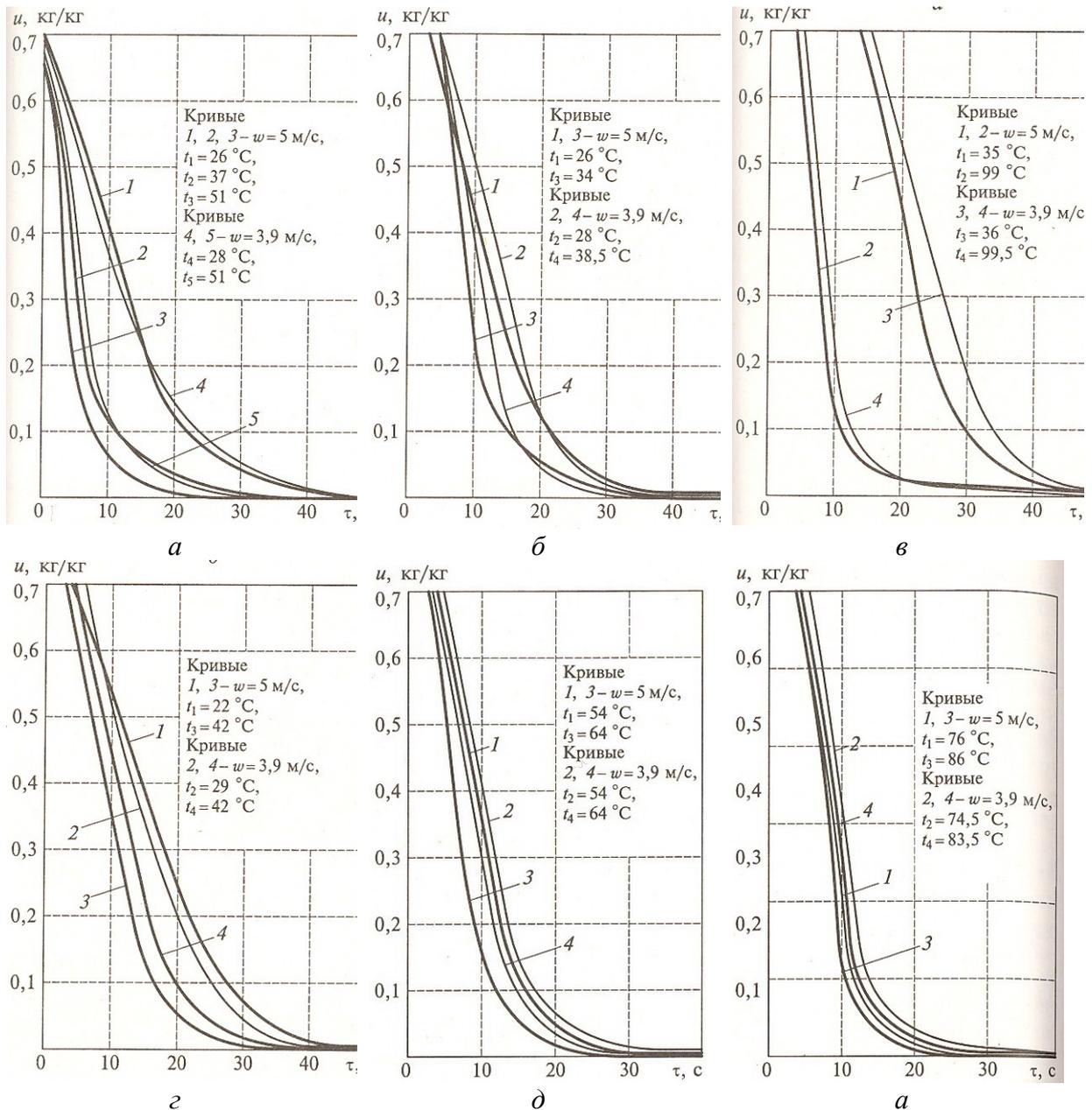
Рассмотрим влияние температуры просасываемого воздуха на интенсивность сушки. В первых опытах исследована сушка мебельной ткани «Газон», артикул Н-175-Р, при скорости воздуха 3,9 и 5 м/с и при пяти различных температурах воздуха. Результаты опытов представлены приведенными кривыми сушки на фиг.6,а. Как следует из кривых 1, 2 и 3, при скорости потока 5м/с переход от температуры воздуха 26°C к температуре 37°C, т.е. повышение на 11°C, ведет к значительной интенсификации процесса, при этом, время сушки сокращается примерно на 21%. Дальнейшее повышение температуры до  $t = 51^\circ\text{C}$  (на 14°C) также интенсифицирует процесс, при этом, время сушки сокращается на 30%. Общее время сокращения процесса при повышении температуры от 26 до 51°C (на 25°C) составляет 59%. При скорости потока воздуха 3,9 м/с повышение его температуры от 28 до 51°C (на 23°C) сокращает время сушки примерно на 51% (кривые 4 и 5).

Подобные опыты проведены с другими мебельными тканями – «Плетенка»,  $\delta = 1,35$  мм и «Коллега»,  $\delta = 1,8$  мм – фиг.6,б,в. При этом, в последнем случае диапазон изменения температур был значительным – от 35 до 99°C. Этот фактор является доминирующим по сравнению с изменением скорости просасываемого воздуха. Влажность 0,1 кг/кг достигнута при 99°C за 11с вместо 30с при  $t = 35^\circ\text{C}$  (скорость в обоих случаях  $w = 5$  м/с), т.е. почти в 3 раза быстрее.

В интервале температур 20÷83,5°C проведены опыты с мебельной тканью «Отель», арт.49532,  $\delta = 1,6$  мм – фиг.6,г,д,е. Результаты находятся в согласии с предыдущими опытами. На этих рисунках показана достаточно точная фиксация опытных данных по экспериментальным точкам.

Исследование тяжелой и толстой ткани – сукна огнестойкого с пропиткой,  $\delta = 2,5$  мм, арт.6425, выполнено также в достаточно широком диапазоне температур – от 30°C до 99°C при тех же скоростях воздуха. Здесь можно отметить влияние толщины и плотности ткани, что заметно снижает влияние температурных условий на процесс сушки. Например, увеличение температуры воздуха на 11÷13,5°C от температурного уровня 30-33°C сокращает время сушки на 16-18%; рост температуры на 10-11°C от уровня 54-55°C – на 18-20%; рост температуры от 30 до 65°C (на 35°C) сокращает время процесса примерно на 25%. Влажности 0,1 кг/кг материал достигает в 2 раза быстрее при увеличении температуры воздуха с 30 до 99°C при одной и той же скорости  $w = 5$  м/с.

Принятые в настоящем исследовании значения скоростей 3,9 и 5 м/с обеспечивают достаточно интенсивное удаление свободной влаги «вытеснением» и дальнейший процесс сушки без повышенного расхода воздуха. Хотя различие скоростей относительно невелико (28%), в ряде случаев этот фактор оказывает заметное влияние на процесс. В основном, увеличение скорости в принятых пределах вызывает уменьшение времени сушки от 12 до 18%.



Фиг.6. Кинетические кривые фильтрационной сушки исследованных тканей при различных температурах и скоростях воздуха.

## Литература

- [1] Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968, 472 с.
- [2] Светлов Ю.В. Термовлажностные процессы в материалах и изделиях легкой промышленности. – М.: Издат.центр «Академия», 2006, 272 с.
- [3] Черхинский Б.М. и др. Использование газа для интенсификации процесса сушки и термической обработки тканей, – М.: Гизлегпром, 1959.
- [4] Eodtes J., Pressburg B.S. Drying heat and mass transfer, Chem.Eng., № 15, 1961.