УДК 677.072 : 536.2

ЗАКОНОМЕРНОСТИ КАПИЛЛЯРНОГО ВПИТЫВАНИЯ ЖИДКОСТИ ПРЯЖЕЙ*

И. П. КОРНЮХИН, А. А. САВЕЛЬЕВ, Д. И. КОРНЮХИН

(Московская государственная текстильная академия им. А. Н. Косыгина)

В [1] при сопоставлении экспериментальных и теоретических данных выявлено, что при малых и больших, близких к единице значениях X, наблюдается удовлетворительное согласие теории с экспериментом, которое ухудшается при промежуточных значениях X. Для анализа причин такого расхождения опытные данные представлены на рис. 1 в логарифмическом анаморфозе.

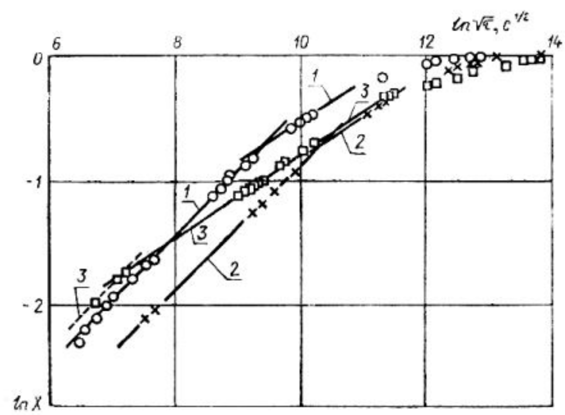

Рис. 1.

Для образцов нераскрученной пряжи *1*, *2* на графике наблюдаются два явно выраженных прямолинейных участка: при малых X с наклоном 1/2, что соответствует формуле (12) из [1], и с наклоном 1/3 в области промежуточных значений X. Для образца раскрученной пряжи *3* опытные данные не противоречат существованию участка с наклоном 1/2 (штриховая линия). Участки с наклоном 1/3 характерны для пряжи, однако не выявлены в цилиндрических капиллярах постоянного сечения.

Предположим, что пряжа представляет собой систему капиллярных каналов разных размеров с различными значениями γ. Допустим также существование прямо пропорциональной зависимости между среднеквадратичным значением удельной поверхности канала $\overline{\gamma^2}$ и величиной квадрата удельной поверхности γ в окрестности фронта жидкости:

$$\overline{\gamma^2} = \alpha^2\gamma^2, \tag{1}$$

где α^2 — коэффициент пропорциональности.

* Окончание. Начало см. в № 2 за 1997 г.

Фронт жидкости в каждом из капиллярных каналов движется неравномерно, причем скорости движения согласно (9) и (10) из [1] должны зависеть от γ. Если фронт жидкости в одном из каналов опережает фронт жидкости в другом канале, то должен наблюдаться экстремум (максимум) величины X как функции γ. При вычислении производной $\partial X/\partial\gamma$ в (9) с учетом (10) из [1], а также (1) имеем

$$(1-X)\,[-\ln(1-X)-X]=X^2/3. \tag{2}$$

Корень X_m этого уравнения, найденный на ЭВМ методом дихотомии, составляет 0,65. При непосредственной проверке по знаку второй производной можно убедиться, что данный экстремум является максимумом. Согласно (10) из [1] движению фронта жидкости, характеризующемуся увеличением x, соответствует увеличение удельной поверхности γ:

$$\gamma=\rho g x/(\sigma X_m \cos\Theta). \tag{3}$$

Зависимость координаты фронта жидкости от времени можно найти из совместного решения системы уравнений (9) и (10) из [1] и уравнений (2) и (3):

$$x^3=3k\sigma^2\cos^2\Theta\,(1-X_m)\,X_m\tau/2\alpha^2\eta\rho g. \tag{4}$$

Как видно из (4), в рассматриваемом случае зависимость координаты x от времени описывается соотношением $x\sim\tau^{1/3}$, что объясняет наблюдающийся на рис. 1 наклон участков прямых, равный 1/3, и подтверждает сделанное выше предположение.

Проведенный анализ позволяет представить картину движения фронта жидкости в системе капилляров пряжи следующим образом. В начале при малых значениях X лидирует фронт жидкости в наиболее крупном капилляре с минимальным значением γ' удельной поверхности. При этом процесс описывается уравнением (12) из [1] и прямая на рис.1 имеет наклон 1/2. В точке X' пересечения прямых с наклоном 1/2 и 1/3 начинается участок смены лидерства, характеризующийся наклоном 1/3 (4) и продолжающийся вплоть до X_m. На этом участке фронт жидкости во всех более мелких капиллярах обгоняет таковой в более крупных капиллярах, пока лидерство не перейдет к наиболее мелкому капилляру с наибольшей γ_* удельной поверхностью.

Дополнительное подтверждение этому механизму движения фронта жидкости можно получить путем вычисления скорости фронта $W=dx/d\tau$ и определения условий, при которых наблюдается максимум W. В результате обнаружено, что максимум скорости наблюдается в канале при $X=0{,}5<X_m$. Таким образом, в фиксированный момент времени скорость фронта жидкости в канале-лидере меньше, чем в более мелком капилляре, поэтому последний в дальнейшем становится лидером, поскольку тормозящее влияние сил тяжести в более мелких каналах начинает проявляться позже, чем в крупных.

Третий характерный участок кривой капиллярного впитывания наблюдается при значениях X, близких к единице. В этих условиях общее уравнение (9) из [1] преобразуется при предельном переходе к виду

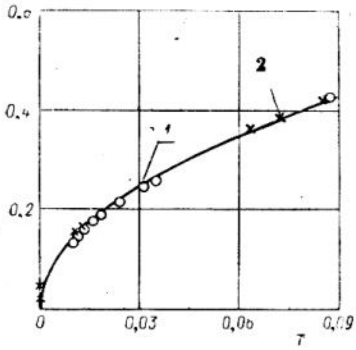

Рис. 2.

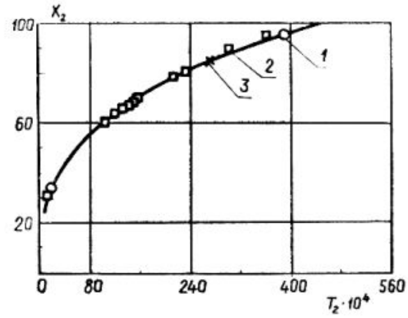

Рис. 3.

$$X = 1 - \exp(-T) \tag{5}$$

и описывает экспоненциальный процесс установления равновесия.

Предложенная теория позволяет адекватно описать опытные данные на всех стадиях процесса капиллярного впитывания. На рис. 2, 3, 4 приведены опытные данные и нанесены кривые согласно уравнениям (11) из [1], (4) и (5) соответственно для первого, второго и третьего характерных участков. На рис. 3 безразмерные координаты X_2 и T_2 определены как

$$X_2 = x\sqrt{\rho g/\sigma \cos \Theta},$$
$$T_2 = 3k\sqrt{\rho g \sigma \cos \Theta}\tau/2\alpha^2\eta,$$

а теоретическая кривая описывается уравнением (4), которое в безразмерной форме преобразуется к виду

$$X_2 = [(1 - X_m) X_m T_2]^{1/3}. \tag{6}$$

На рис. 4 кривая, построенная по уравнению (6), хорошо обобщает опытные данные для нераскрученной пряжи (*1, 2*) и хуже — для раскрученной пряжи (*3*). Предполагается, что причина таких отклонений состоит в неоднородности структуры раскрученной пряжи в области значений X, близких единице, хотя визуально каких-либо нарушений структуры не выявлено, косвенным подтверждением чему является кривая пропитки (имеющая точку перегиба) для образца нераскрученной пряжи, на которой явно выражен дефект — местное утонение с последующим утолщением.

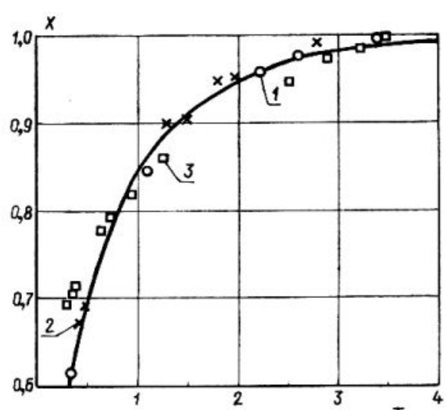

Рис. 4.

Экспериментальные исследования капиллярного подъема масел в фитилях [2] показали, что полученные данные описываются зависимостью $x \sim \tau^n$, где n изменяется согласно образцу ткани и виду масла в диапазоне 0,34...0,50. Такие особенности поведения кривых капиллярного впитывания, не объясненные в [2], вполне закономерны с точки зрения развитого нами подхода. Если кривая пропитки из [2] соответствует первому, начальному участку, в логарифмических координатах, то она имеет наклон 0,50; если кривая соответствует второму участку, то ее наклон составляет 0,33. В остальных случаях, когда кривая пропитки из [2] содержит отрезки первого и второго участков в различных пропорциях, при графическом усреднении в логарифмических координатах получаются промежуточные от 0,33 до 0,50 значения показателя степени.

Предложенная теория позволяет использовать экспериментальные данные капиллярного впитывания жидкости для определения диапазона изменения величины γ удельной поверхности каналов в пряже в окрестности фронта пропитки, которая изменяется в пределах второго характерного участка кривой пропитки, и для решения поставленной задачи служит информация о положении границ этого участка. Согласно (3)

$$X'/\gamma' = X_m/\gamma_*. \tag{7}$$

Способы определения величин X', X_m и γ_* описаны ранее и это уравнение позволяет рассчитать минимальное значение γ' удельной поверхности γ канала.

Величина γ обратно пропорциональна среднему радиусу кривизны фронта жидкости в канале [1], что по изменению γ дает возможность судить об изменении размеров капиллярных каналов в пряже и ввести относительный показатель $\varkappa$, характеризующий это изменение:

$$\begin{aligned}\varkappa = (1/\gamma' - 1/\gamma_*)/(1/\gamma') \equiv (\gamma_* - \gamma')/\gamma_* \equiv \\ \equiv (X_m - X')/X_m \approx (r_{\max} - r_{\min})/r_{\max}.\end{aligned} \tag{8}$$

Вычисленные значения $\varkappa$ для образцов нераскрученной пряжи составили 0,2, а для раскрученной $\approx 0{,}7$. Как и следовало ожидать, диапазон изменения размеров межволоконных каналов в раскрученной пряже более широкий.

Как отмечалось в [1], по графику рис. 2 согласно (12) из [1] определяется величина комплекса $k\gamma'/\overline{\gamma}^2$, а по высоте h максимального подъема — значение γ_*. Из рис. 1 находят X' и по уравнению (7) рассчитывают γ', что для первого участка позволяет определить величину γ^2/k, а с учетом (1) и величину α^2/k. Последняя предполагается постоянной на всех трех участках кривой, что подтверждается путем сопоставления теоретических и экспериментальных данных. Тогда для третьего участка кривой соотношение $k/\gamma\overline{\gamma}^2$ соответствует $k/(\alpha^2\gamma^3_*)$.

Приводим значения некоторых из полученных параметров:

$$k\gamma'/\overline{\gamma}^2 \sim 8\cdot 10^{-8}\ \text{м};\ \gamma \sim 3\cdot 10^4\ \text{м}^{-1};$$

$$k/\overline{\gamma}^2 \sim 2\cdot 10^{-12}\ \text{м}^2;\ \alpha^2/k \sim 4\cdot 10^2.$$

Константы k и α вычислить по отдельности не представляется возможным. В [3] изучалось влияние каналов с призматической формой поперечного сечения на величину потерь давления на трение, на основании чего можно заключить, что малые по величине острые углы в сечении канала обусловливают высокие значения относительного критерия Жуковского [3], обратного по величине коэффициенту k формы канала. В межволоконных каналах такие углы проявляются в местах касания или наибольшего сближения волокон. Связанное с этим уменьшение k характеризует достаточно высокие значения α^2/k и пониженные значения k/γ^2.

Следовательно, рассмотренный метод позволяет однозначно определить максимальную γ_* и минимальную γ' величины удельной поверхности каналов, а по уравнению (8) приближенно рассчитать относительную величину диапазона изменения характерных размеров капиллярных каналов.

Таким образом, предлагаемые нами теоретический и экспериментальный подходы по сравнению с известными методами можно использовать для более детального исследования капиллярных характеристик текстильных изделий и полуфабрикатов, а информацию о величине удельной поверхности — при расчете кинетики процессов переноса: сорбции, десорбции, сушки, крашении, промывки. По значению удельной поверхности оцениваются поперечные размеры межволоконных капилляров в пряже, от величины которых, по-видимому, зависит прочность пряжи.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены возможные способы описания капиллярного впитывания жидкости пряжей в поле сил тяжести и предложена оригинальная теория описания движения фронта жидкости в капиллярной структуре с каналами различных поперечных размеров.

2. Определены диапазон изменения удельных поверхностей капиллярных каналов в пряже, показатель относительной величины диапазона изменения величин удельных поверхностей и приближенный показатель характерных размеров каналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Корнюхин И. П. и др.*//Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. — 1997, № 2.
2. *Laughlin R. D., Davies J. E.*//Textile Research J. — 1961. V. 31, № 10.
3. *Темкин Г. А., Савельев П. А.* Гидродинамика и теплообмен при течениях в каналах сложной конфигурации. — Рига, РПИ, 1976.

Рекомендована кафедрой промышленной теплоэнергетики. Поступила 04.10.96.