

УДК 666.189.21:666/2:532.516.5

ДИСКРЕТНАЯ МОДЕЛЬ РАЗДУТИЯ ЗАПАЯННОГО КАПИЛЛЯРА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЕЧИ С НЕРАВНОМЕРНЫМ ОСЕВЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПРОФИЛЕМ

А. А. Маковецкий

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
(Фрязинский филиал), 141190 Фрязино Московской области
E-mail: maz226@ms.ire.rssi.ru

Предложена дискретная модель раздутия запаянного стеклянного капилляра в высокотемпературной печи с произвольным осевым температурным профилем. Получена система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая кинетику раздутия капилляра, а также система алгебраических уравнений для нахождения осевого профиля максимально раздутого капилляра. Проанализировано два режима раздутия: режим раздутия неподвижно зафиксированного капилляра и режим раздутия капилляра при его подаче в высокотемпературную печь с постоянной или переменной скоростью. Проведена экспериментальная проверка полученных результатов численных расчетов в случае спекания капиллярныхборок — заготовок для микроструктурированных оптических волокон.

Ключевые слова: дискретная модель капилляра, кинетика раздутия, капиллярная сборка, микроструктурированное оптическое волокно.

Микроструктурированные (дырчатые) оптические волокна (ОВ) представляют собой кварцевые волокна, в теле которых имеется семейство воздушных отверстий (микрокапилляров), расположенных параллельно оси волокон [1–3]. Данные ОВ, обладающие рядом свойств, отличающихся от свойств обычных ОВ, используются для нелинейного преобразования света (в частности, для генерации светового континуума), а также в качестве чувствительных элементов датчиков для измерения физических величин, в качестве активных сред волоконных лазеров и т. д.

Одним из методов получения заготовок (преформ) для дырчатых ОВ является метод капиллярной сборки. Капиллярная сборка представляет собой плотно упакованные в опорную кварцевую трубку центральный кварцевый стержень и расположенные вокруг него запаянные кварцевые капилляры. Перед вытяжкой из капиллярной сборки дырчатого ОВ ее надо спечь в единое целое.

Основным элементом технологии спекания капиллярной сборки является процесс раздутия одиночного запаянного капилляра при его нагреве в высокотемпературной (ВТ) печи. В работе [4] рассмотрена кинетика раздутия запаянного капилляра в идеализированной ВТ-печи с прямоугольным осевым температурным профилем. Целью данной работы является анализ кинетики раздутия запаянного капилляра в зоне нагрева реальной ВТ-печи, когда форма осевого температурного профиля существенно отличается от прямоугольной. При этом рассматривается два режима раздутия капилляра: режим раздутия капилляра, неподвижно зафиксированного в ВТ-печи, и режим раздутия капилляра при его подаче в ВТ-печь с постоянной или переменной скоростью.

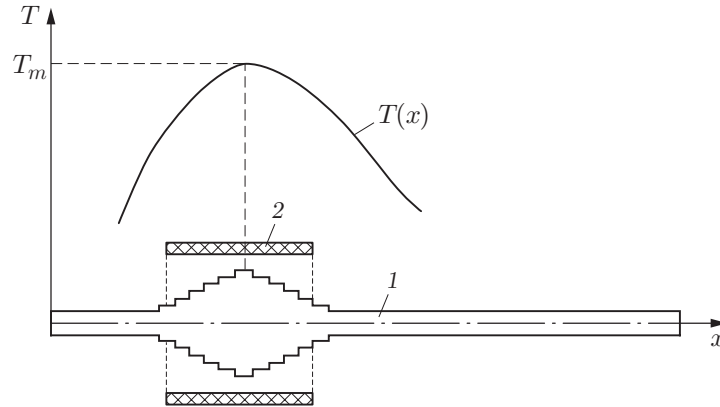


Рис. 1. Схема дискретной модели раздутия капилляра:
 1 — капилляр, 2 — нагревательный элемент, $T(x)$ — осевой температурный профиль ВТ-печи

1. Раздутие капилляра, неподвижно зафиксированного в ВТ-печи. Рассмотрим запаянный с двух концов капилляр, неподвижно зафиксированный в ВТ-печи с некоторым осевым температурным профилем $T(x)$ (рис. 1). Вследствие нагрева внутри капилляра возникает избыточное давление, под действием которого расплавленный участок капилляра начинает раздуваться. По мере раздутия капилляра избыточное давление внутри него уменьшается. Процесс раздутия завершается, когда давление внутри капилляра становится равным внешнему давлению.

Течение расплава кварцевого стекла при раздутии капилляра является медленным течением ньютоновской несжимаемой жидкости. При раздутии капилляра в идеализированной ВТ-печи с прямоугольным осевым температурным профилем имеет место одномерное радиальное течение, при этом процесс раздутия описывается обыкновенным дифференциальным уравнением относительно квадрата нормированного внутреннего радиуса раздуваемого участка капилляра χ [4]:

$$\frac{\mu}{P_0} \frac{\varepsilon \dot{\chi}}{\chi(\chi + \varepsilon)} = \frac{P_a(\chi)}{P_0} - 1 - \frac{\sigma}{a_0 P_0} \left(\frac{1}{\sqrt{\chi}} + \frac{1}{\sqrt{\chi + \varepsilon}} \right); \quad (1)$$

$$\chi(0) = 1. \quad (2)$$

Здесь $\chi(t) = a(t)^2/a_0^2$; $a(t)$, a_0 — текущий и начальный внутренние радиусы капилляра соответственно; b_0 — начальный внешний радиус капилляра; $\varepsilon = b_0^2/a_0^2 - 1$ — относительная толщина капилляра; P_0 — атмосферное давление; μ , σ — вязкость и поверхностное натяжение расплава стекла; t — текущее время; $P_a(\chi)$ — давление внутри капилляра, определяемое по формуле [4]

$$P_a(\chi) = \left[1 + \left(\frac{T}{T_0} \chi - 1 \right) \frac{\Delta}{l} \right] \left[1 + (\chi - 1) \frac{\Delta}{l} \right]^{-2} P_0, \quad (3)$$

Δ , l — длины зоны расплава и капилляра в целом соответственно; T , T_0 — температуры в зоне расплава и окружающей среде, К.

Обобщим уравнение (1) на случай раздутия капилляра в ВТ-печи с произвольным осевым температурным профилем $T(x)$. Для этого условно разделим капилляр на конечное число дискретов n_d одинаковой длины δ ($l = n_d \delta$). На капилляре выделим зону раздутия, включающую дискрет с максимальной температурой. Размер зоны раздутия определим из следующего условия: на концах этой зоны вязкость расплава в 10 раз больше вязкости при максимальной температуре. Пусть k — число раздуваемых дискретов. Обозначим че-

рез T_j ($j = 1, \dots, n_d$) температуру, соответствующую середине j -го дискрета. Предположим, что на каждом раздуваемом дискрете капилляр раздувается равномерно. Обозначим через $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k$ нормированные диаметры раздуваемых дискретов, а через $\chi_i \equiv 1$ ($i = k + 1, \dots, n_d$) — нормированные диаметры нераздуваемых дискретов. Можно показать, что в этом случае выражение для относительного давления внутри капилляра имеет вид

$$\frac{P_a(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)}{P_0} = l\delta^{-1} \left(\sum_{j=1}^k T_{j+1} T_0^{-1} \chi_j + \sum_{j=1+k}^{n_d} T_j T_0^{-1} \right) \left(\sum_{j=1}^k \chi_j + \sum_{j=1+k}^{n_d} 1 \right)^{-2}. \quad (4)$$

Подставляя выражение (4) в уравнение (1) для каждого раздуваемого дискрета, получаем систему k обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка относительно квадратов нормированных радиусов раздуваемых дискретов. Если ввести нормированную переменную $\tau = t/(\mu_m/P_0)$, то эта система примет вид

$$\begin{aligned} \dot{\chi}_1 &= \frac{\mu_m}{\mu_1} \frac{\chi_1(\chi_1 + \varepsilon)}{\varepsilon} \left(\frac{P_a(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)}{P_0} - 1 - \frac{\sigma}{a_0 P_0} \left(\frac{1}{\sqrt{\chi_1}} + \frac{1}{\sqrt{\chi_1 + \varepsilon}} \right) \right), \\ \dot{\chi}_2 &= \frac{\mu_m}{\mu_2} \frac{\chi_2(\chi_2 + \varepsilon)}{\varepsilon} \left(\frac{P_a(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)}{P_0} - 1 - \frac{\sigma}{a_0 P_0} \left(\frac{1}{\sqrt{\chi_2}} + \frac{1}{\sqrt{\chi_2 + \varepsilon}} \right) \right), \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \quad (5)$$

$$\dot{\chi}_k = \frac{\mu_m}{\mu_k} \frac{\chi_k(\chi_k + \varepsilon)}{\varepsilon} \left(\frac{P_a(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)}{P_0} - 1 - \frac{\sigma}{a_0 P_0} \left(\frac{1}{\sqrt{\chi_k}} + \frac{1}{\sqrt{\chi_k + \varepsilon}} \right) \right),$$

где $\mu_j = \mu(T_j)$ ($j = 1, \dots, k$) — вязкость j -го раздуваемого дискрета при температуре T_j ; $\mu(T)$ — температурная зависимость вязкости кварцевого стекла; μ_m — наименьшая вязкость раздуваемых дискретов. Систему (5) дополним начальными условиями

$$\chi_1(0) = \chi_2(0) = \chi_3(0) = \dots = \chi_k(0) = 1. \quad (6)$$

Проведем качественный анализ системы (5). Скорость раздутия дискрета капилляра определяется избыточным давлением, скорость его сжатия — капиллярным давлением. В зависимости от значения отношения скорости сжатия к скорости раздутия в начальный момент времени $\gamma = \sigma(a_0 P_0)^{-1}(1 + (1 + \varepsilon)^{-1/2})/(P_a(1, 1, \dots, 1)/P_0 - 1)$ возможно как раздутие капилляра, так и его частичное схлопывание.

В случае $\gamma = 0$ ($\sigma = 0$, “чистое” раздутие) капилляр монотонно раздувается, причем при $\tau \rightarrow \infty$ диаметр капилляра стремится к предельному значению. Скорость раздутия каждого дискрета обратно пропорциональна его вязкости, поэтому наиболее значительно раздувается дискрет с наименьшей вязкостью (наиболее нагретый).

При $0 \leq \gamma < 1$ (раздутие с последующим частичным схлопыванием) все дискреты капилляра сначала монотонно раздуваются, что приводит к уменьшению избыточного давления внутри капилляра. Вследствие этого в некоторый момент раздутия становится отрицательной суммарная скорость изменения объема крайнего дискрета зоны раздутия (наименее нагретого), затем соседнего с ним и т. д. В результате все дискреты, за исключением наиболее нагретого, начинают схлопываться: при $\tau \rightarrow \infty$ $\chi_j(\tau) \rightarrow 0$ для всех $j \neq jm$ (jm — номер наиболее нагретого дискрета). При этом диаметр наиболее нагретого дискрета стремится к наибольшему значению: $\chi_{jm}(\tau) \rightarrow \chi_m > 1$.

При $\gamma = 1$ размеры капилляра не изменяются с течением времени: давление и сила поверхностного натяжения уравновешивают друг друга.

При $\gamma > 1$ уже в начале процесса имеет место схлопывание всех дискретов капилляра: при $\tau \rightarrow \infty$ $\chi_j(\tau) \rightarrow 0$ для всех $j = 1, \dots, k$.

Выведем уравнения для нахождения предельного осевого профиля раздуваемого капилляра. При раздутии капилляра ($0 \leq \gamma < 1$) диаметр каждого раздуваемого дискрета стремится к предельному значению, при этом скорость раздутия стремится к нулю: $\chi_j(\tau) \rightarrow \chi_{jm}$, $\chi'_j(\tau) \rightarrow 0$ при $\tau \rightarrow \infty$.

При $\gamma = 0$, интегрируя систему (5) и выполняя предельный переход при $\tau \rightarrow \infty$, получаем систему уравнений

$$\begin{aligned} \mu_1 \ln \frac{\chi_1(1 + \varepsilon)}{\chi_1 + \varepsilon} &= \mu_m \ln \frac{\chi_m(1 + \varepsilon)}{\chi_m + \varepsilon}, \\ \mu_2 \ln \frac{\chi_2(1 + \varepsilon)}{\chi_2 + \varepsilon} &= \mu_m \ln \frac{\chi_m(1 + \varepsilon)}{\chi_m + \varepsilon}, \\ &\dots\dots\dots \\ \mu_k \ln \frac{\chi_k(1 + \varepsilon)}{\chi_k + \varepsilon} &= \mu_m \ln \frac{\chi_m(1 + \varepsilon)}{\chi_m + \varepsilon}. \end{aligned} \tag{7}$$

Заметим, что в системе k алгебраических уравнений (7) независимыми являются $k - 1$ уравнение (одно из уравнений представляет собой тождество). Необходимое k -е уравнение найдем из условий $\chi'_j(\tau) \rightarrow 0$ при $\tau \rightarrow \infty$ ($j = 1, \dots, k$). Подставляя эти условия в (5), получаем

$$l\delta^{-1} \left(\sum_{J=1}^k T_{j+1} T_0^{-1} \chi_{jm} + \sum_{j=1+k}^{n_d} T_j T_0^{-1} \right) \left(\sum_{j=1}^k \chi_{jm} + \sum_{j=1+k}^{n_d} 1 \right)^{-2} - 1 = 0, \tag{8}$$

т. е. при $\tau \rightarrow \infty$ относительное избыточное давление внутри капилляра стремится к нулю. Решением системы (7), (8) являются величины $\chi_{jm} > 1$ для всех $j = 1, \dots, k$.

При $0 < \gamma < 1$ предельный осевой профиль капилляра удовлетворяет системе уравнений

$$\begin{aligned} \frac{\mu_m}{\mu_1} \frac{\chi_1(\chi_1 + \varepsilon)}{\varepsilon} \left(\frac{P_a(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)}{P_0} - 1 - \frac{\sigma}{a_0 P_0} \left(\frac{1}{\sqrt{\chi_1}} + \frac{1}{\sqrt{\chi_1 + \varepsilon}} \right) \right) &= 0, \\ \frac{\mu_m}{\mu_2} \frac{\chi_2(\chi_2 + \varepsilon)}{\varepsilon} \left(\frac{P_a(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)}{P_0} - 1 - \frac{\sigma}{a_0 P_0} \left(\frac{1}{\sqrt{\chi_2}} + \frac{1}{\sqrt{\chi_2 + \varepsilon}} \right) \right) &= 0, \\ &\dots\dots\dots \\ \frac{\mu_m}{\mu_k} \frac{\chi_k(\chi_k + \varepsilon)}{\varepsilon} \left(\frac{P_a(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)}{P_0} - 1 - \frac{\sigma}{a_0 P_0} \left(\frac{1}{\sqrt{\chi_k}} + \frac{1}{\sqrt{\chi_k + \varepsilon}} \right) \right) &= 0. \end{aligned} \tag{9}$$

Физически обоснованным решением системы (9) являются величины $\chi_j = 0$, если $j \neq jm$, и $\chi_j = \chi_m > 1$, если $j = jm$. Величина χ_m определяется из уравнения

$$P_a(0, 0, \dots, \chi_m, 0, \dots, 0) P_0^{-1} - 1 - \frac{\sigma}{a_0 P_0} \left(\frac{1}{\sqrt{\chi_m}} + \frac{1}{\sqrt{\chi_m + \varepsilon}} \right) = 0. \tag{10}$$

Важной характеристикой кинетики раздутия является время раздутия капилляра. Формально время, за которое профиль раздуваемого капилляра становится предельным,

равно бесконечности. В данной работе это время будем определять как время t_ξ , по истечении которого приращение объема раздуваемого капилляра сколь угодно мало отличается от максимального:

$$(1 - \xi) \sum_{j=1}^k (\chi_{jm} - 1) = \sum_{j=1}^k (\chi_j(t_\xi) - 1). \quad (11)$$

Здесь $\xi \ll 1$. Величину t_ξ можно найти из уравнения (11) численным методом, решив предварительно системы (5), (7), (8) или (10).

2. Раздутие капилляра при его пошаговой подаче в ВТ-печь. Данный способ раздутия капилляра применяется для увеличения длины раздуваемого участка. Рассмотрим дискретную модель капилляра, который пошагово подается в зону нагрева ВТ-печи. Пусть длина шага равна ширине дискрета капилляра, при этом время выдержки капилляра в ВТ-печи на каждом шаге может варьироваться. На каждом шаге кинетика раздутия описывается собственной системой дифференциальных уравнений. Начальные условия для n -го шага можно получить из решения системы на предшествующем шаге. Через 18 шагов раздутие всех дискретов завершается и их диаметр фиксируется.

В системе координат, жестко связанной с капилляром, температурный профиль ВТ-печи на n -м шаге описывается выражением $T_n(x) = T(x - (n - 1)\delta)$, где $T(x)$ — исходный профиль на первом шаге. Зададим координаты центров дискретов $x_j = x_2 + (n - 1)\delta$ (x_2 — координата начала зоны раздутия). Выражение для избыточного давления на n -м шаге имеет вид

$$\frac{P_n(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)}{P_0} = \frac{l\delta^{-1} \left(\sum_{j=1}^{n-1} T_{n,j} T_0^{-1} \chi R_j + \sum_{j=0}^k T_{n,j+n} T_0^{-1} \chi_j + \sum_{j=n+k}^{n_d} T_{n,j} T_0^{-1} \right)}{\left(\sum_{j=1}^{n-1} \chi R_j + \sum_{j=1}^k \chi_j + \sum_{j=n+k}^{n_d} 1 \right)^2}, \quad (12)$$

где $T_{n,j}$ — температура j -го дискрета на n -м шаге раздутия.

Заменив в системе (5) выражение для избыточного давления $P_a(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$, определяемого формулой (4), на выражение для избыточного давления $P_n(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)$, определяемого формулой (8), получаем систему дифференциальных уравнений, описывающую кинетику раздутия капилляра на n -м шаге:

$$\begin{aligned} \dot{\chi}_1 &= \frac{\mu_m}{\mu_1} \frac{\chi_1(\chi_1 + \varepsilon)}{\varepsilon} \left(\frac{P_n(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)}{P_0} - 1 \right) - \frac{\sigma}{a_0 P_0} \left(\frac{1}{\sqrt{\chi_1}} + \frac{1}{\sqrt{\chi_1 + \varepsilon}} \right), \\ \dot{\chi}_2 &= \frac{\mu_m}{\mu_2} \frac{\chi_2(\chi_2 + \varepsilon)}{\varepsilon} \left(\frac{P_n(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)}{P_0} - 1 \right) - \frac{\sigma}{a_0 P_0} \left(\frac{1}{\sqrt{\chi_2}} + \frac{1}{\sqrt{\chi_2 + \varepsilon}} \right), \\ &\dots \end{aligned} \quad (13)$$

$$\dot{\chi}_k = \frac{\mu_m}{\mu_k} \frac{\chi_k(\chi_k + \varepsilon)}{\varepsilon} \left(\frac{P_n(\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_k)}{P_0} - 1 \right) - \frac{\sigma}{a_0 P_0} \left(\frac{1}{\sqrt{\chi_k}} + \frac{1}{\sqrt{\chi_k + \varepsilon}} \right).$$

Начальные условия для системы (13) на первом шаге раздутия ($n = 1$) имеют вид

$$\chi_1^1(0) = \chi_2^1(0) = \dots = \chi_k^1(0) = 1. \quad (14)$$

По окончании раздутия на первом шаге фиксируется диаметр первого дискрета $\chi R_1 = \chi_1^1(\Delta\tau)$ ($\Delta\tau$ — время раздутия на шаге).

На последующих шагах ($n > 1$) начальные условия имеют вид

$$\begin{aligned} \chi_1^n(0) &= \chi_2^{n-1}(\Delta\tau), \\ \chi_2^n(0) &= \chi_3^{n-1}(\Delta\tau), \\ &\dots\dots\dots \\ \chi_{k-1}^n(0) &= \chi_k^{n-1}(\Delta\tau), \\ \chi_k^n(0) &= 1, \end{aligned} \tag{15}$$

где $\chi_i^{n-1}(\Delta\tau)$ ($i = 1, \dots, k$) — диаметр i -го дискрета в конце $(n - 1)$ -го шага раздутия. В конце n -го шага раздутия фиксируется диаметр n -го дискрета $\chi R_n = \chi_1^n(\Delta\tau)$ и т. д.

3. Численное моделирование кинетики раздутия капилляра. С помощью системы Mathcad проведено численное моделирование кинетики раздутия капилляра, основанное на уравнениях (4)–(13). В расчетах осевой температурный профиль ВТ-печи задавался выражением

$$T(x) = \begin{cases} T_0, & x < 127, \quad x > 357, \\ 2,14T_m \left(\frac{x - 126}{80}\right)^{0,65} \exp\left(-\left(\frac{x - 126}{80}\right)^{1,65}\right), & 127 \leq x \leq 357, \end{cases} \tag{16}$$

где $T_0 = 23$ °С. Выражение (16) представляет собой аппроксимацию замеренного с помощью (W-Re)-термопары температурного профиля ВТ-печи, используемого в дальнейших экспериментах. Внутренний диаметр нагревательного элемента составлял 24 мм, длина — 26 мм. Температурная зависимость вязкости кварцевого стекла в интервале температур $1550 \div 1850$ °С задавалась выражением

$$\mu(T) = 5,86 \cdot 10^{-8} \exp\left(\frac{E}{RT}\right),$$

где $E = 494$ кДж/моль; $R \approx 8,31$ кДж/(моль · К); T — температура, К.

На рис. 2–4 приведены результаты расчетов для запаянных капилляров, неподвижно зафиксированных в ВТ-печи, в случаях “чистого” раздутия ($\gamma = 0$), раздутия с последующим частичным схлопыванием ($0 < \gamma < 1$) и схлопывания ($\gamma > 1$). Число раздуваемых дискретов равно 18, $D_0 = 2b_0$, $d_0 = 2a_0$ — начальные внешний и внутренний диаметры капилляра.

На рис. 2 видно, что в случае “чистого” раздутия диаметры всех дискретов при $\tau > 0$ монотонно возрастают, асимптотически приближаясь к значениям, определяемым системой (7), (8).

Характер кривых на рис. 3 (раздутие с последующим частичным схлопыванием) отличается от характера кривых на рис. 2. На начальном этапе процесса ($0 \leq \tau \equiv t/(\mu_m/P_0) \leq \tau_p \approx 0,22$, где τ_p — нормированное время раздутия), как и в случае “чистого” раздутия, диаметры всех дискретов монотонно возрастают. При $\tau > \tau_p$ кривая, соответствующая максимально нагретому дискрету, медленно приближается к кривой, определяемой уравнением (10). Остальные дискреты начинают схлопываться, причем чем сильнее нагрет дискрет, тем быстрее происходит схлопывание. Время, в течение которого схлопываются дискреты, находящиеся на краях зоны раздутия ($j = 1, \dots, k$, $\mu_1 = \mu_k = 10\mu_m$), наибольшее. Можно показать, что для нормированного времени схлопывания этих дискретов справедлива оценка $\tau_{схл} = t_{схл}/(\mu_m/P_0) \approx 20\varepsilon^{0,5} P_0/(\sigma/a_0)$. Для рассмотренных размеров капилляра и температуры нагревательного элемента $\tau_p/\tau_{схл} \approx 0,02 \ll 1$, т. е. время схлопывания существенно больше времени раздутия.

На рис. 4 видно, что в случае схлопывания все дискреты капилляра начинают схлопываться уже в начале процесса.

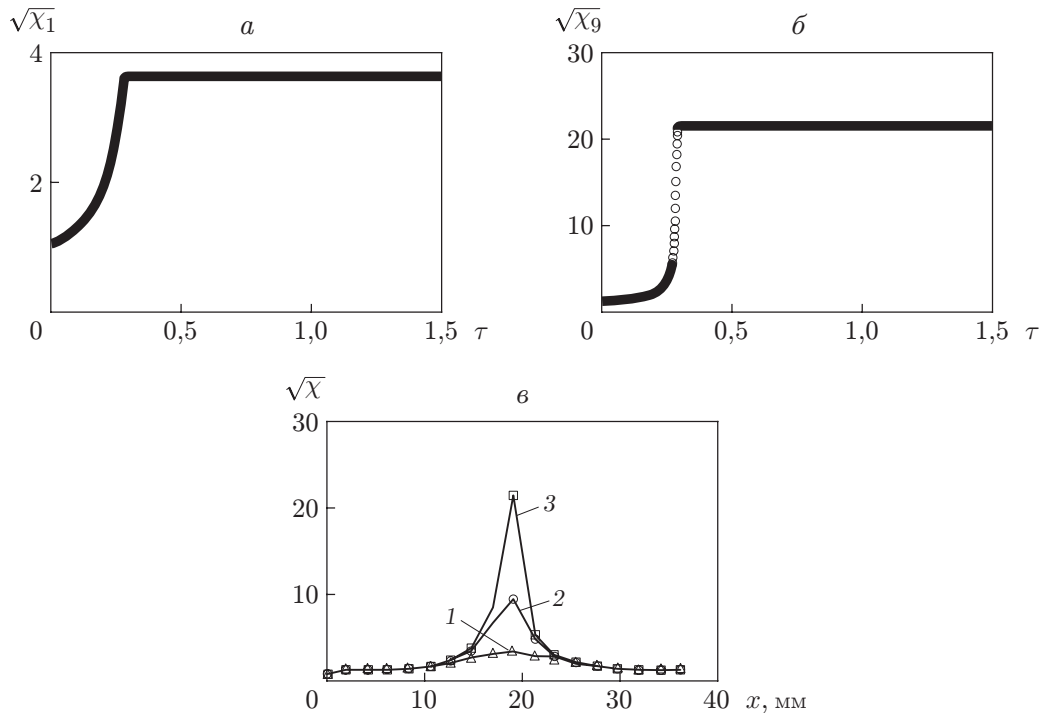


Рис. 2. Результаты численных расчетов для режима “чистого” раздутия запаянных капилляров, неподвижно зафиксированных в ВТ-печи ($D_0/d_0 = 800/685$ мкм/мкм, $l = 250$ мм, $\sigma = 0$ ($\gamma = 0$), $T_m = 1685$ °С):
a — кинетика раздутия первого дискрета; *б* — кинетика раздутия девятого дискрета;
в — осевые профили капилляров в различные моменты раздутия (1 — $\tau = 0,17$; 2 — $\tau = 0,19$; 3 — $\tau = 1,00$ (максимально раздутый профиль))

Следует отметить, что ширина раздутых участков оказалась существенно меньше ширины зоны раздутия, равной 34 мм (см. рис. 2, *в*, 3, *в*). Это обусловлено тем, что более нагретые (менее вязкие) участки раздуваются быстрее менее нагретых. Наиболее четко это видно на осевом профиле максимально раздутого капилляра. Использование модели с числом дискретов более 18 позволит получить более гладкую аппроксимацию осевого профиля, при этом ширина раздутого участка не увеличится.

На рис. 5, *a* приведены расчетные осевые профили капилляров ($D_0/d_0 = 800/685$ мкм/мкм) при их пошаговой подаче в ВТ-печь с постоянным временем выдержки на каждом шаге τ_B . Расчеты проведены для трех нормированных времен выдержки, общее число шагов равно 99. Длины раздутых участков оказались существенно больше, чем в режиме раздутия неподвижно зафиксированного капилляра. Однако раздутие было неравномерным по длине раздуваемого участка капилляра. Это обусловлено значительным уменьшением избыточного давления внутри капилляра, после того как было достигнуто максимальное раздутие (рис. 5, *б*).

Для получения более равномерного профиля нужно использовать режим раздутия с переменным временем выдержки на каждом шаге. В данной работе применялся следующий алгоритм изменения времени выдержки. На первых 18 шагах время выдержки было постоянным, что соответствовало подаче капилляра в ВТ-печь на половину длины зоны раздутия. Корректировка времени выдержки проводилась начиная с 10-го шага. При этом время выдержки на каждом следующем шаге увеличивалось таким образом, чтобы приращение суммарного объема капилляра на каждом шаге было постоянным.

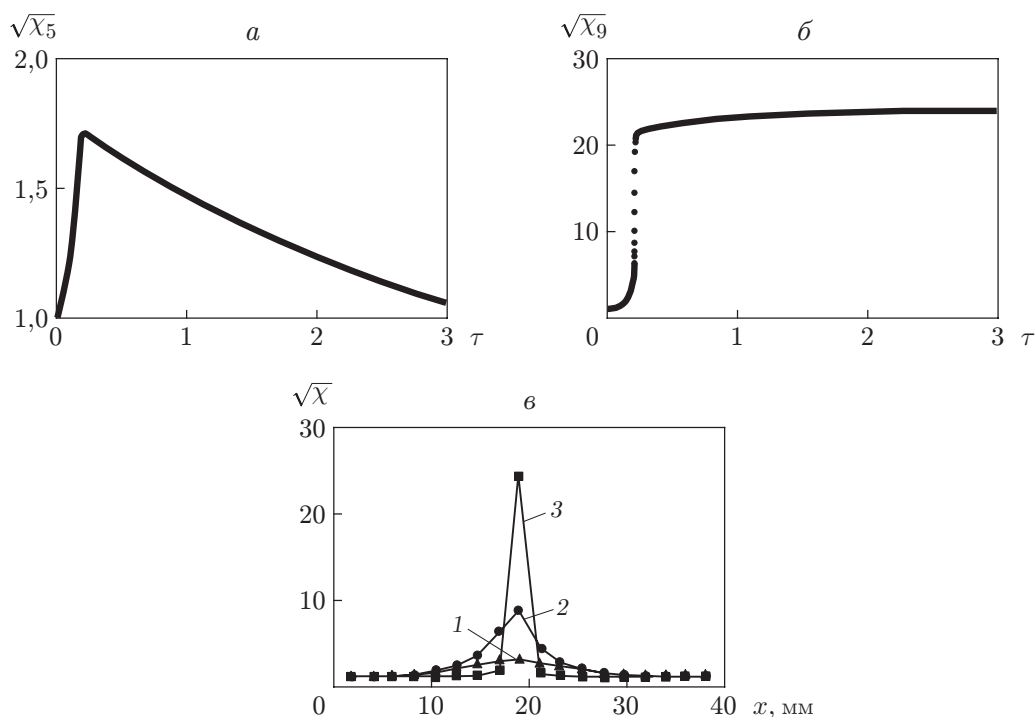


Рис. 3. Результаты численных расчетов для режима раздутия с последующим частичным схлопыванием запаянных капилляров, неподвижно зафиксированных в ВТ-печи ($D_0/d_0 = 120/100$ мкм/мкм, $l = 250$ мм, $\sigma = 0,4$ Н/м ($\gamma = 0,078$), $T_m = 1685$ °С):

a — кинетика раздутия пятого дискрета; *б* — кинетика раздутия девятого дискрета; *в* — осевые профили капилляров в различные моменты раздутия (*1* — $\tau = 0,177$; *2* — $\tau = 0,200$; *3* — $\tau = 3,000$)

Результаты расчетов для режима пошагового раздутия капилляров ($D_0/d_0 = 800/685$ мкм/мкм) с переменным временем выдержки на шаге приведены на рис. 6. Начальные времена выдержки те же, что и у капилляров, раздутых при постоянном времени выдержки. На рис. 6 видно, что капилляр раздувался равномерно (колебания имели место только на передних фронтах профилей). Следует отметить, что при выбранном режиме раздутия время выдержки на шаге существенно возрастает к моменту окончания раздутия. Например, при начальном значении времени выдержки на шаге $\tau_B = 0,006$ к моменту окончания раздутия время выдержки возрастает приблизительно в 100 раз. Кроме того, максимальная длина, на которой происходит относительно равномерное раздутие, зависит от необходимого диаметра раздуваемого капилляра: чем сильнее раздувается капилляр, тем меньше длина, на которой происходит раздутие.

4. Результаты экспериментов. Результаты проведенного теоретического анализа были сопоставлены с данными экспериментов по раздутию кварцевых капилляров ($D_0/d_0 = 800/685$ мкм/мкм, $l = 250$ мм) в ВТ-печи вытяжной установки с нагревательным элементом НЭ-24/26. Температурный профиль ВТ-печи задан выражением (14), максимальная температура варьировалась от 1400 до 1850 °С. Использовались два режима раздутия: режим раздутия неподвижно зафиксированного капилляра в зоне нагрева и режим раздутия капилляра при его подаче с постоянной скоростью.

На рис. 7, *a* приведены измеренные внешние диаметры неподвижно зафиксированных капилляров ($D_0/d_0 = 810/700$ мкм/мкм), раздуваемых при температуре $T_m = 1430$ °С

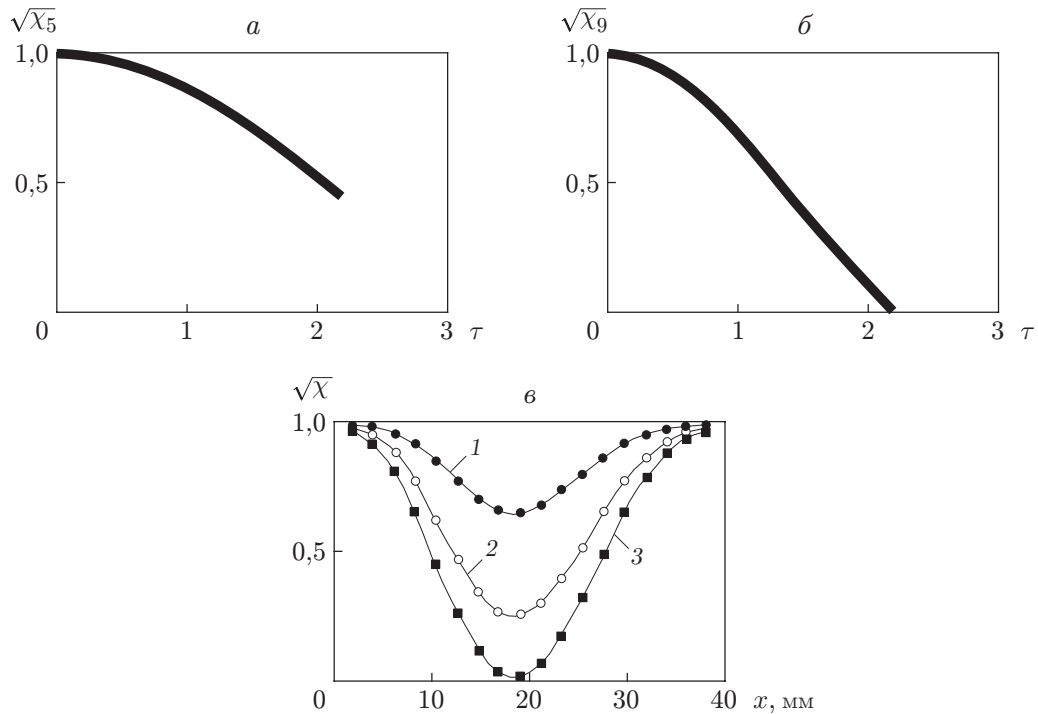


Рис. 4. Результаты численных расчетов для режима схлопывания запаянных капилляров, неподвижно зафиксированных в ВТ-печи ($D_0/d_0 = 4,56/3,80$ мкм/мкм, $l = 250$ мм, $\sigma = 0,4$ Н/м ($\gamma = 1,027$), $T_m = 1685$ °С):

a — кинетика раздутия пятого дискрета; *b* — кинетика раздутия девятого дискрета; *в* — осевые профили капилляров в различные моменты раздутия (1 — $\tau = 1,085$; 2 — $\tau = 1,736$; 3 — $\tau = 2,170$)

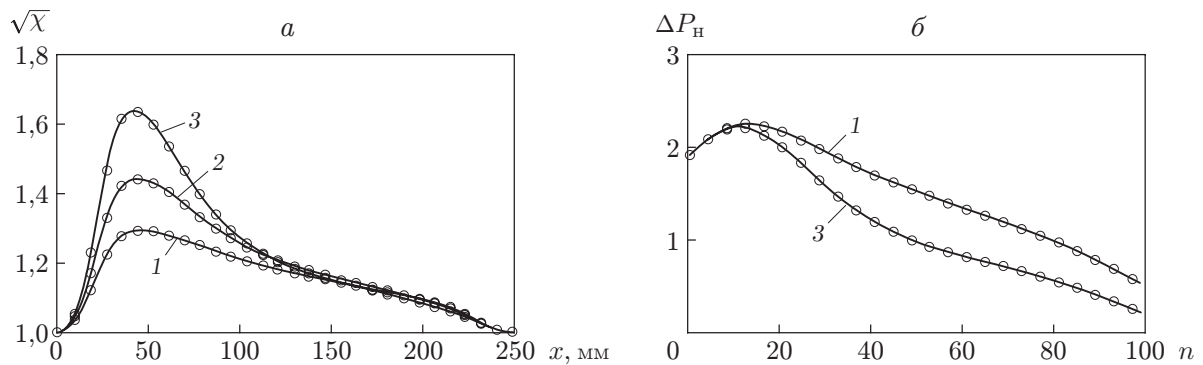


Рис. 5. Результаты численных расчетов для режима пошагового раздутия запаянных кварцевых капилляров с постоянным временем выдержки на каждом шаге ($D_0/d_0 = 800/685$ мкм/мкм, $l = 250$ мм, $\sigma = 0$, $T_m = 1685$ °С):

a — осевые профили раздуваемых капилляров, *б* — зависимость избыточного нормированного давления от номера шага раздутия; 1 — $\tau_B = 0,06$, 2 — $\tau_B = 0,08$, 3 — $\tau_B = 0,10$

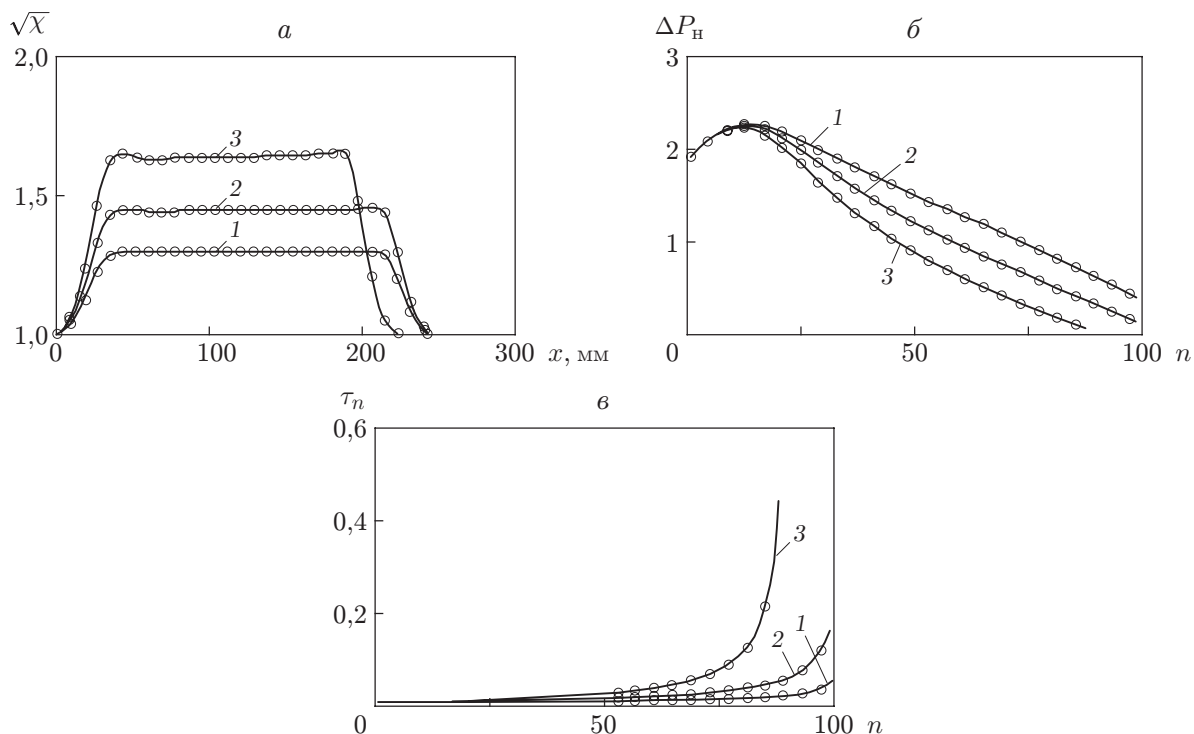


Рис. 6. Результаты численных расчетов для режима пошагового раздутия запаянных кварцевых капилляров с переменным временем выдержки на шаге ($D_0/d_0 = 800/685$ мкм/мкм, $l = 250$ мм, $\sigma = 0$, $T_m = 1685$ °C):
 а — осевые профили раздуваемых капилляров, б — зависимость избыточного нормированного давления от номера шага раздутия, в — зависимость времени выдержки от номера шага раздутия; 1 — время выдержки на первых 18 шагах раздутия $\tau_n = 0,06$, 2 — $\tau_n = 0,08$, 3 — $\tau_n = 0,10$

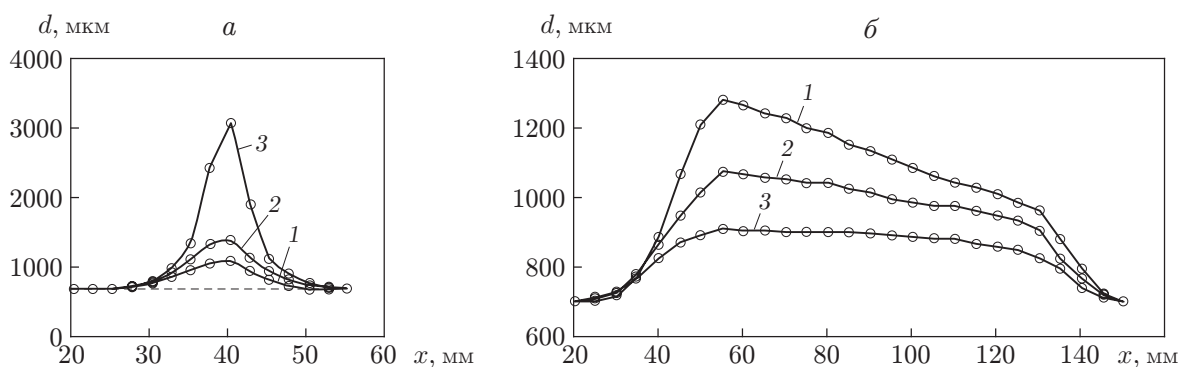


Рис. 7. Экспериментальные осевые профили кварцевых капилляров ($D_0/d_0 = 810/700$ мкм/мкм, $l = 250$ мм), раздутых в ВТ-печи при $T_m = 1430$ °C:
 а — режим раздутия неподвижно зафиксированных капилляров (1 — $t_{\text{в}} = 2$ мин, 2 — $t_{\text{в}} = 3$ мин, 3 — $t_{\text{в}} = 5$ мин 15 с); б — режим подачи капилляра с постоянной скоростью (1 — $v = 5$ мм/мин, 2 — $v = 7$ мм/мин, 3 — $v = 10$ мм/мин)

и различных временах выдержки. Видно, что осевые профили имеют колоколообразную форму. Это вызвано неравномерным нагревом капилляра в зоне раздутия. Эффективность раздутия капилляра зависит от времени раздутия, при этом длина раздутого участка не превышает длину нагревательного элемента (26 мм). Например, при времени выдержки 5 мин 15 с начальный внутренний диаметр капилляра, составляющий 685 мкм, увеличился до значения, равного 3100 мкм.

Для увеличения длины участка, на котором раздувается капилляр, и более равномерного его раздутия капилляр подавался в ВТ-печь с постоянной скоростью. На рис. 7,б приведены осевые профили капилляров, раздутых при подаче в ВТ-печь с различными скоростями V_3 . Ход подачи (расстояние, на которое опускается капилляр при его подаче в ВТ-печь с момента начала подачи до момента ее окончания) составлял 100 мм, что соответствует приблизительно 50 шагам в дискретной модели ($\delta = 2$ мм). Подача осуществлялась сверху вниз, время выдержки на каждом шаге равно $t_b = \delta/V_3$. В начальном положении нижний торец капилляра выступал из нагревательного элемента на $1,5 \div 2,0$ мм.

Заметим, что левые и правые фронты осевых профилей соответствуют начальному и конечному положениям капилляров. Диаметр раздуваемого капилляра, достигнув наибольшего значения на переднем фронте, монотонно уменьшался по направлению к концу участка раздутия, что обусловлено уменьшением избыточного давления внутри капилляра в направлении его раздутия. Чем меньше скорость подачи капилляра, тем сильнее раздувался капилляр, но при этом профиль капилляра после его раздутия был менее равномерным и раздутие капилляра происходило на меньшей длине.

В ходе экспериментов по раздутию одиночных капилляров были опробованы режимы спекания в ВТ-печи капиллярных сборок с одним или двумя слоями капилляров. За счет раздутия расплавленных участков капилляров происходило вытеснение воздуха из межкапиллярных полостей и спекание раздутых капилляров между собой, с опорной трубкой и центральным стержнем, в результате чего сборка становилась единым целым. Затем из спеченных сборок были вытянуты образцы микроструктурированных ОВ, в том числе активных (ОВ, сердцевина которых дополнительно легирована активными центрами, как правило, ионами редкоземельных металлов) [4].

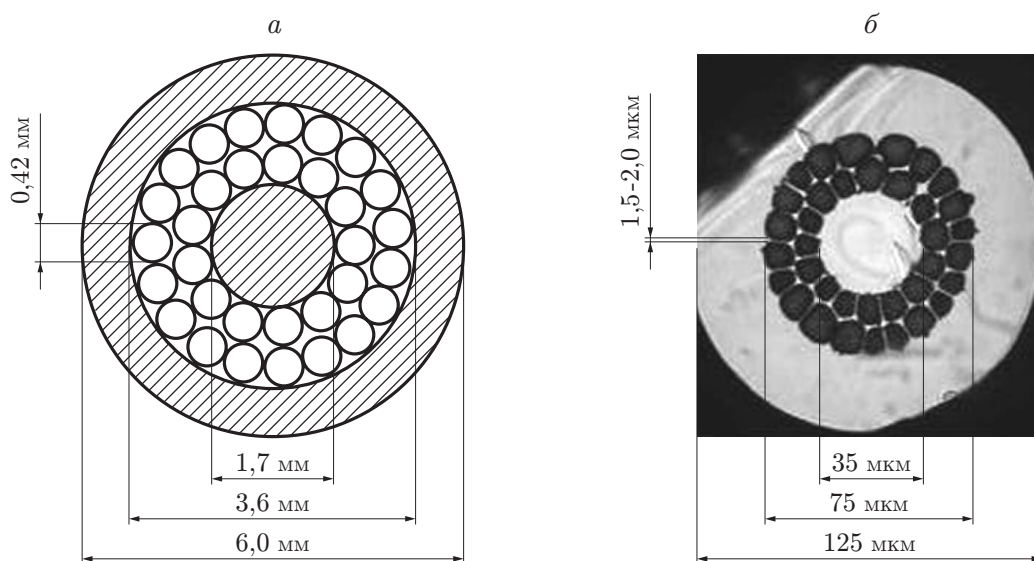


Рис. 8. Поперечные сечения исходной капиллярной сборки с двумя слоями капилляров (а) и вытянутого из этой сборки (после спекания) микроструктурированного оптического волокна (б)

На рис. 8 показаны поперечные сечения исходной чисто кварцевой капиллярной сборки с двумя слоями капилляров и вытянутого из нее дырчатого многомодового ОВ. Размеры поперечного сечения сборки — $6,00 \times 3,60 \times (20,00 \times 0,42) \times (13,00 \times 0,42) \times 1,70$ мм. Внешний диаметр ОВ составлял 125 мкм, диаметр сердцевины — 35 мкм, толщина воздушно-кварцевой оболочки — 20 мкм, толщина кварцевой “паутины” — $1,5 \div 2,0$ мкм; числовая апертура — 0,4. Активное дырчатое ОВ изготавливалось с помощью замены в исходной капиллярной сборке центрального кварцевого стержня на стержень, полученный перетяжкой заготовки ОВ, сердцевина которого была дополнительно легирована ионами иттербия Yb^{3+} .

ЛИТЕРАТУРА

1. Knight J. C., Birks T. A., Russel P. St., Atkin D. M. All-silica-single-mode-fiber with photonic crystal cladding // Opt. Lett. 1996. V. 21, N 19. P. 1547–1549.
2. Monro T. M., Richardson D. J., Broderick N. G. R., Bennet P. J. Holey optical fibers: efficient modal model // J. Lightwave Technol. 1999. V. 17, N 6. P. 1092–1102.
3. Russel R. St. J. Photonic-crystal fibers // J. Lightwave Technol. 2006. V. 14, N 12. P. 4729–4747.
4. Замятин А. А., Маковецкий А. А. Раздутие капилляров в капиллярных сборках // Опт. журн. 2006. Т. 73, № 1. С. 66–72.

*Поступила в редакцию 22/IV 2010 г.,
в окончательном варианте — 6/XI 2010 г.*
