Оптический журнал

Оптическое материаловедение и технология

УДК 666.189.21: 666.2: 532.516.5

Моделирование процесса раздутия запаянных кварцевых капилляров в высокотемпературной печи вытяжной установки

© 2017 г. А. А. Маковецкий, канд. физ.-мат. наук; А. А. Замятин, канд. техн. наук; Г. А. Иванов, доктор хим. наук

Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Фрязино, Московская обл.

E-mail: maz226@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 24.11.2016

С помощью ранее предложенной дискретной модели численными методами изучен процесс раздутия запаянного кварцевого капилляра в высокотемпературной (ВТ) печи с произвольным осевым температурным профилем. Рассмотрены два режима этого процесса — раздутие при неподвижной фиксации капилляра в ВТ печи и раздутие при его шаговой подаче в ВТ печь с постоянной или переменной выдержками на шаге. Учтено влияние времени нагрева капилляра на кинетику процесса раздутия. Данная модель является теоретическим обоснованием выбора режимов спекания капилляров в капиллярных сборках — заготовках для микроструктурированных оптических волокон.

Проведена экспериментальная проверка полученных теоретических результатов при раздутиях кварцевых капилляров для капиллярных сборок различной структуры, что важно для практических применений.

Ключевые слова: *кварцевый капилляр, дискретная модель капилляра, высокотемпературная печь, раздутие запаянного капилляра, спекание капилляров в капиллярной сборке.*

Коды OCIS: *220.0220.*

1. ВВЕДЕНИЕ

Дырчатое (микроструктурированное) оптическое волокно (ОВ) представляет собой кварцевое волокно, в теле которого имеется семейство воздушных микрокапилляров, параллельных его оси. Благодаря своей воздушно-кварцевой структуре они обладают рядом уникальных свойств, отличных от свойств обычных ОВ [1–4]. Данные ОВ используются в телекоммуникационных системах, в устройствах для нелинейного преобразования света (в частности, генерации светового континуума), в качестве чувствительных элементов датчиков физических величин, активных сред волоконных лазеров и для других применений.

Одним из методов получения преформ (заготовок) для дырчатых ОВ является метод капиллярной сборки. Капиллярная сборка представляет собой плотно упакованные в опорную кварцевую трубку центральный кварцевый стержень и расположенные вокруг него кварцевые капилляры. Перед перетяжкой сборки в ОВ (или непосредственно во время перетяжки) необходимо удалить воздух (аргон) из межкапиллярных полостей и спечь сборку в единое целое. Для этого используют процесс раздутия капилляров при нагреве сборки в высокотемпературной печи вытяжной установки за счёт создания в них избыточного давления. Как правило, избыточное давление в капиллярах создают путём подачи внешнего давления, для чего требуется весьма сложное устройство.

Целью данной работы является моделирование и экспериментальное исследование режимов раздутия запаянного кварцевого капилляра за счёт избыточного давления, возникающего в капилляре при его нагреве в ВТ печи, т.е. без использования внешнего давления.

2. УРАВНЕНИЯ, ОПИСЫВАЮЩИЕ КИНЕТИКУ РАЗДУТИЯ ДИСКРЕТНОЙ МОДЕЛИ КАПИЛЛЯРА ПРИ ЕГО ШАГОВОЙ ПОДАЧЕ В ВТ ПЕЧЬ

Рассмотрим ВТ печь с осевым температурным профилем $T(x)$. Пусть T_m — максимальная температура профиля (рис. 1); система координат жёстко

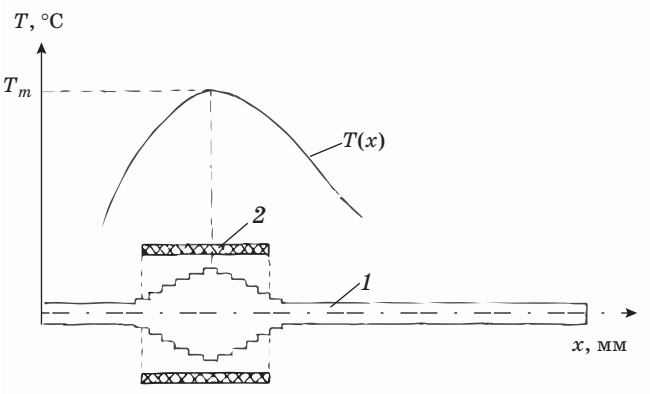

Рис. 1. Схема дискретной модели раздутия капилляра. *1* — капилляр, *2* — нагревательный элемент, $T(x)$ — осевой температурный профиль ВТ печи.

связана с ВТ печью. Из всего температурного профиля выделим зону раздутия, задаваемую условием $T_b \le T \le T_m$, где T_b — температура, при которой вязкость расплава в 10 раз больше вязкости при максимальной температуре. Обозначим через x_2 и x_3 граничные точки зоны раздутия, а через $\Delta = x_3 - x_2$ — её ширину.

Условно разделим запаянный с двух сторон капилляр длиной l на конечное число дискретов n_d одинаковой длины Δ ($l = n_d\Delta$). Пусть a_0 и b_0 — начальные внутренний и внешний радиусы капилляра, $a_j(t)$ — текущее значение внутреннего радиуса j-го раздуваемого дискрета. Поместим капилляр в начальное положение в ВТ печь и начнём пошагово подавать его вниз с шагом Δ и определенной выдержкой на шаге. На каждом шаге раздуваются дискреты, находящиеся в пределах зоны раздутия ВТ печи. Обозначим через $k < n_d$ число раздуваемых дискретов: $k\Delta = \Delta$. Предположим, что на любом шаге каждый из них равномерно раздувается по своей длине. По окончании раздутия на очередном шаге диаметр вышедшего из зоны раздутия дискрета в дальнейшем не изменяется.

Для упрощения анализа предположим, что на первом шаге подачи ($n = 1$) нижний торец находится на нижней границе зоны нагрева (т.е. при $x = x_3$). В этом случае координаты центров дискретов капилляра задаются соотношением $x_j = x_2 + (j - 0{,}5)\Delta$, где $j = 1 - n_d$ — номер дискрета капилляра. На последующих шагах подачи ($n = 2 - n_p$) это соотношение принимает вид: $xx_{n,j} = x_j - (n - 1)\Delta$. Обозначим через $TC_{n,j}$ значение температурного профиля (°C), соответствующее середине j-го дискрета на n-ом шаге подачи: $TC_{n,j} = T(xx_{n,j})$.

В работе [5] была получена система дифференциальных уравнений, описывающая кинетику пошагового раздутия дискретной модели капилляра в ВТ печи в предположении, что нагрев дискретов капилляра и изменение их температуры после подачи капилляра на шаг происходили мгновенно. На каждом шаге кинетика раздутия капилляра описывалась своей системой из k дифференциальных уравнений относительно диаметров раздуваемых дискретов капилляра. При этом вязкости дискретов капилляра на каждом шаге были фиксированы.

Обобщим эту систему на случай, учитывающий конечность времени нагрева капилляра, задав временну́ю зависимость температуры j-го дискрета капилляра на n-ом шаге подачи $TCk_{n,j}(t)$ следующим образом:

$$TCk_{n,j}(t) = TC_{n,j} - (TC_{n,j} - TC0_{n,j})\exp(-t / x_h), \quad (1)$$

где t — время от момента фиксации капилляра на n-ом шаге подачи, $TC0_{n,j} \equiv TCk_{n,j}(0)$ — начальная температура j-го дискрета на n-ом шаге раздутия, x_h — параметр, характеризующий время нагрева капилляра. Последовательность $TC0_{n,j}$ задаётся рекуррентным соотношением

$$TC0_{n+1,j} = TC_{n,j} - (TC_{n,j} - TC0_{n,j})\exp(-\Delta t / x_h), \quad (2)$$

где Δt — время выдержки на шаге. На первом шаге раздутия величина $TC0_{n,j}$ равна комнатной температуре T_0.

Выражение для давления внутри капилляра на n-ом шаге подачи имеет вид

$$\frac{P_n(t, \chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_k)}{P_0} = \frac{l\delta^{-1}\left(\sum_{j=1}^{n-1} TK_{n,j}(t)TK_0^{-1}\chi R_j + \sum_{J=1}^{k} TK_{n,j+n}(t)TK_0^{-1}\chi_j + \sum_{j=n+k}^{n_d} TK_{n,j}(t)TK_0^{-1}\right)}{\left(\sum_{j=1}^{n-1}\chi R_j + \sum_{j=1}^{k}\chi_j + \sum_{j=n+k}^{n_d} 1\right)^2}, \quad (3)$$

В формуле (3) обозначено: $TK_{n,j}(t) = TCk_{n,j}(t) + 273$ и $TK_0 = 296K$ — температуры дискретов и комнатная температура в Кельвинах; $\chi R_j = (a_j/a_0)^2$ — квадрат нормированного внутреннего радиуса j-го раздутого дискрета ($j = 1 - (n - 1)$); $\chi_j = (a_{j+n-1}/a_0)^2$ — квадрат нормированного внутреннего радиуса j-го раздуваемого дискрета ($j = 1 - k$); для $j = n + k - n_d$ $(a_j/a_0)^2 = 1$.

Выражения для вязкостей раздуваемых дискретов на n-ом шаге подачи задаются следующим образом:

$$\eta_j(t) = \mu(TCk_{n,j+n-1}(t) + 273), \quad (4)$$

где $j = 1 - k$, а $\eta = \mu(TK)$ — температурная зависимость вязкости расплава стекла.

Сделав соответствующие замены в системе дифференциальных уравнений работы [5], получим искомую систему дифференциальных уравнений, описывающую кинетику раздутия капилляра на n-ом шаге в нормированной переменной $\tau = t/(\eta_m/P_0)$:

$$\dot{\chi}_1 = \frac{\eta_m}{\eta_1(t)}\frac{\chi_1(\chi_1+\varepsilon)}{\varepsilon}\left(\frac{P_n(t,\chi_1,\chi_2,\ldots,\chi_k)}{P_0}-1\right)- -\frac{\sigma}{a_0P_0}\left(\frac{1}{\sqrt{\chi_1}}+\frac{1}{\sqrt{\chi_1+\varepsilon}}\right);$$

$$\dot{\chi}_2 = \frac{\eta_m}{\eta_2(t)}\frac{\chi_2(\chi_2+\varepsilon)}{\varepsilon}\left(\frac{P_n(t,\chi_1,\chi_2,\ldots,\chi_k)}{P_0}-1\right)- -\frac{\sigma}{a_0P_0}\left(\frac{1}{\sqrt{\chi_2}}+\frac{1}{\sqrt{\chi_2+\varepsilon}}\right); \quad (5)$$

$$\dot{\chi}_k = \frac{\eta_m}{\eta_k(t)}\frac{\chi_k(\chi_k+\varepsilon)}{\varepsilon}\left(\frac{P_n(t,\chi_1,\chi_2,\ldots,\chi_k)}{P_0}-1\right)- -\frac{\sigma}{a_0P_0}\left(\frac{1}{\sqrt{\chi_k}}+\frac{1}{\sqrt{\chi_k+\varepsilon}}\right),$$

где η_m — вязкость расплава стекла, соответствующая температуре T_m, P_0 — атмосферное давление, σ — поверхностное натяжение, $\varepsilon = b_0^2/a_0^2 - 1$.

Начальные условия для системы (5) на первом ($n = 1$) и последующих ($n = 2 - n_d$) шагах раздутия имеют соответственно вид:

$$\chi_1^1(0) = \chi_2^1(0) = \ldots\chi_k^1(0) = 1; \quad (6)$$

$$\chi_1^n(0) = \chi_2^{n-1}(\Delta\tau);\ \ \chi_2^n(0) = \chi_3^{n-1}(\Delta\tau);$$
$$\chi_{k-1}^n(0) = \chi_k^{n-1}(\Delta\tau);\ \ \chi_k^n(0) = 1, \quad (7)$$

где $\chi_i^{n-1}(\Delta\tau)$ ($i = 1, \ldots, k$) — решение системы (5) на ($n - 1$)-ом шаге в момент окончания раздутия ($\Delta\tau$ — время раздутия на шаге). По окончании раздутия на n-ом шаге фиксируется размер n-го раздутого дискрета $\chi R_n = \chi_1^n(\Delta\tau)$ и так далее.

Отметим качественное свойство задачи (5)–(7). Обозначим через P_{in} давление внутри капилляра в начальный момент раздутия на первом шаге. Из формулы (3) при $n = 1$, $t = 0$, $\chi_1 = \chi_2 = \ldots = \chi_{n\partial} = 1$ и $x_h << 1$с получим:

$$P_{in} = l\delta^{-1}\left(\sum_1^{n_d}(TC_{1,j}+273)TK_0^{-1}\right)\left(\sum_{j=1}^{n_d}1\right)^{-2}P_0. \quad (8)$$

Введем параметр: $\gamma = \sigma/a_0(1 + (1 + \varepsilon)^{-1/2})/(P_1(0; 1, 1, \ldots, 1) - P_0)$ — отношение скорости сжатия дискрета к скорости его раздутия в начальный момент времени (для случая мгновенного нагрева капилляра). В зависимости от значения этого параметра может иметь место как раздутие капилляра (при $\gamma < 1$), так и его схлопывание (при $\gamma > 1$).

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАЗДУТИЯ КАПИЛЛЯРА

Для моделирования выберем капилляры с характерными для капиллярных сборок размерами: внутренний диаметр d_0 = 600–800 мкм, внешний диаметр D_0 = 720–1100 мкм, длина l = 250 мкм. Заметим, что для таких капилляров выполняется условие раздутия $\gamma < 1$.

В качестве нагревательного элемента (НЭ) выберем НЭ с внутренним диаметром 16 мм и высотой 15 мм. Измеренный осевой температурный профиль данного НЭ при T_m = 1980 °С (максимальной температуре профиля) приведен на рис. 2. В расчётах его будем аппроксимировать следующей функцией Вейбулла:

$$T(x) = 2{,}207T_m\left(\frac{x-96}{60}\right)^{0{,}75}\exp\left(-\left(\frac{x-96}{60}\right)^{1{,}75}\right). \quad (9)$$

При температурах нагревательного элемента T_m = 1650–1980 °С ширина зоны раздутия данного НЭ составляет Δ = 35,2–38,4 мм, при этом $\Delta << l$.

Наиболее надёжные данные по вязкости кварцевого стекла приведены в работах [6, 7]. В температурном интервале 1550–1750 °С зависимость вязкости от температуры можно аппроксимировать выражением:

$$\eta = \eta_0\exp((E/R)KT), \quad (10)$$

где $\eta_0 = 10^{-6{,}6}$ Па·с — предэкспоненциальный множитель, E = 109,5 ккал/моль — энергия активации, R = 1,98 кал/(мольKT) — универсальная

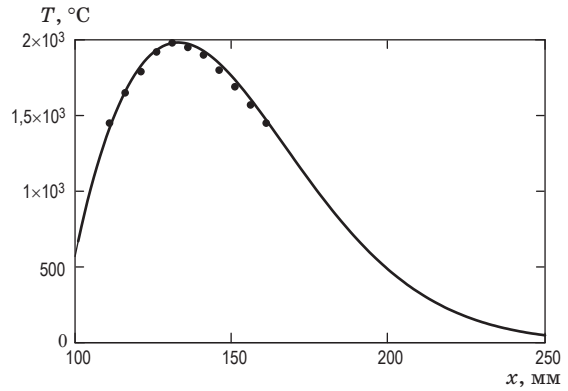

Рис. 2. Измеренный осевой температурный профиль $T(x)$ нагревательного элемента НЭ — 16/15 мм/мм при T_m = 1980 °С и его аппроксимация функцией Вейбулла $T(x) = 2{,}207T_m\left(\frac{x-96}{60}\right)^{0{,}75}\exp\left(-\left(\frac{x-96}{60}\right)^{1{,}75}\right)$.

газовая постоянная, KT — температура в Кельвинах.

Величину поверхностного натяжения примем $\sigma = 0{,}30$ Н/м [8].

3.1. Раздутие при неподвижной фиксации капилляра

Данный режим описывается задачей (6)–(7) на первом шаге раздутия. Выберем число раздуваемых дискретов $k = 18$.

Примеры рассчитанных кривых, иллюстрирующих влияние времени нагрева капилляра на кинетику его раздутия, приведены на рис. 3. На нём представлены зависимости температуры 9-го (наиболее нагретого) дискрета капилляра от времени раздутия и нормированные осевые профили двух одинаковых капилляров, раздутых при одной и той же температуре $T_m = 1710$ °C, но с различными скоростями нагрева. Из приведённых кривых видно, что в пределах зоны раздутия капилляры раздуваются неоднородно. При этом время раздутия τ_s существенно зависит от параметра скорости нагрева x_h. Для двух практически одинаковых раздутых профилей ($\chi_m \approx 13{,}5$) оно имело значение $\tau_{sm} = 0{,}456$ ($x_h = 0{,}001$ с, идеализированный «мгновенный нагрев») и $\tau_s = 0{,}865$ ($x_h = 3$ с, раздутие с конечным временем нагрева). Величина τ_{sm} представляет собой собственно время раздутия капилляра, определяемое вязким течением расплава. Для рассматриваемых в работе параметров процесса величина τ_{sm} изменяется в пределах 0,25–0,50. Учёт времени нагрева капилляра приводит к соотношению: $\tau_s \approx \tau_{sm} + 4x_h/(\eta_m/P_0)$. Из анализа этой формулы следует, что влияние скорости нагрева на время раздутия сильно при относительно высоких температурах ($T_m > 1800$ °C). При температурах $T_m = 1500$–1600 °C это влияние незначительно.

Хотя режим раздутия с неподвижной фиксацией капилляра не годится для раздутия относительно длинных участков капилляров, его анализ позволяет оценить потенциальные возможности шагового режима и изучить влияние времени нагрева на кинетику раздутия.

Предположим, что удалось равномерно раздуть капилляр по всей его длине l, и пусть χ_m — максимально возможный нормированный диаметр раздутия. Пусть ΔP_r — остаточное избыточное давление в капилляре. Так как в этом случае силы

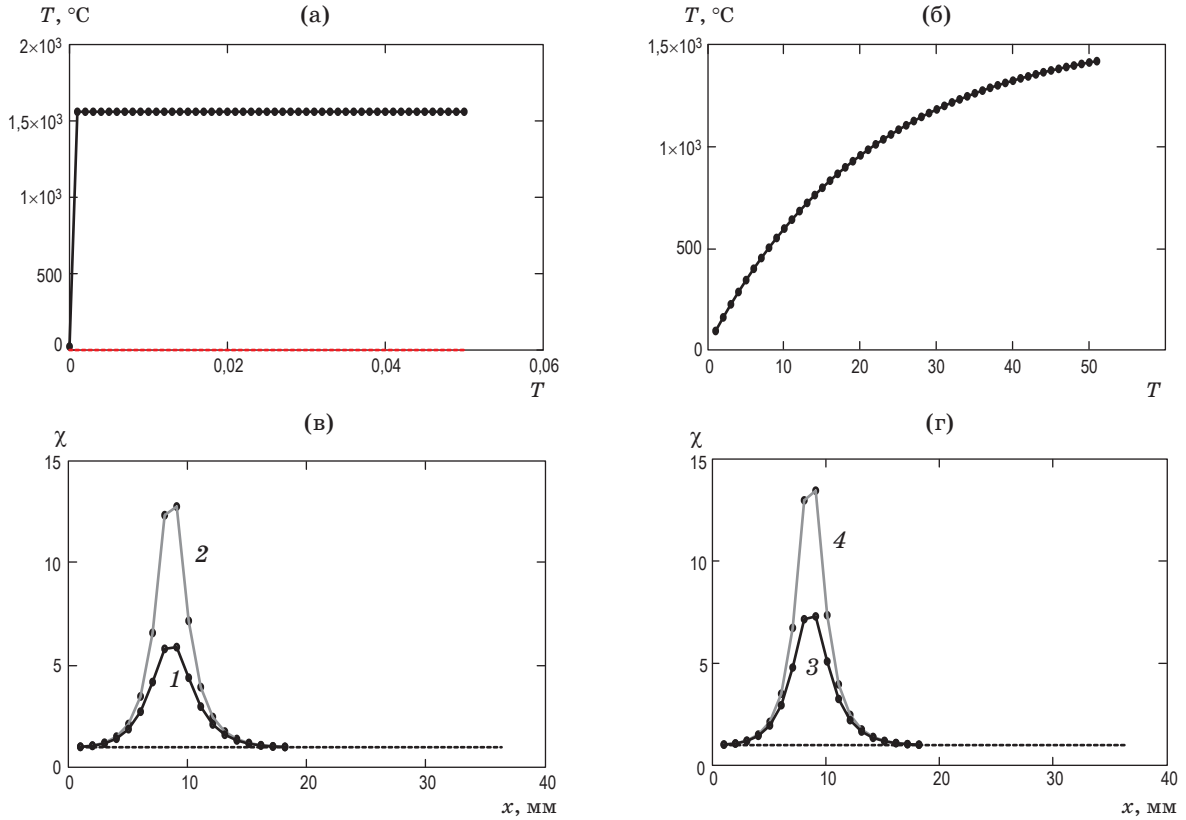

Рис. 3. Рассчитанные кривые для процесса раздутия капилляра при его неподвижной фиксации в ВТ печи. Зависимости температуры 9-го дискрета капилляра от времени нагревания для «мгновенного» нагрева ($x_h = 0{,}001$ с) — (а) и для нагревания с конечным временем нагрева ($x_h = 3$ с) — (б); нормированные осевые профили раздутых капилляров в моменты раздутия $\tau = 0{,}397$ (*1*) и $\tau = 0{,}456$ (*2*) при $x_h = 0{,}001$ с — (в); нормированные осевые профили раздутых капилляров в моменты раздутия $\tau = 0{,}824$ (*3*) и $\tau = 0{,}865$ (*4*) при $x_h = 3$ с — (г). Расчётные параметры: $D_0/d_0 = 1080/730$ мкм/мкм, $l = 250$ мм; $\sigma = 0{,}30$ Н/м, $T_m = 1710$ °C.

поверхностного натяжения и давления уравновешивают друг друга, то из системы (5) следует:

$$\Delta P_r = \frac{\sigma}{a_0}\frac{\chi_m + \sqrt{\chi_m^2 + \varepsilon}}{\chi_m\sqrt{\chi_m^2 + \varepsilon}}. \quad (11)$$

С другой стороны величину ΔP_r можно выразить следующим образом:

$$\Delta P_r = \frac{P_{in}}{\chi_m} - P_0. \quad (12)$$

Приравняв оба выражения для ΔP_{in}, получим уравнение для отыскания χ_m:

$$\left(\frac{\sigma}{a_0}\right)P_0^{-1}\frac{\chi_m + \sqrt{\chi_m^2 + \varepsilon}}{\sqrt{\chi_m^2 + \varepsilon}} = \frac{P_{in}}{P_0} - \chi_m. \quad (13)$$

Для кварцевых капилляров с внутренним диаметром $d_0 > 100$ мкм величина $(\sigma/a_0)/P_0 << 1$, и решение уравнения (13) можно записать:

$$\chi_m \approx P_{in}P_o^{-1} - (\sigma/a_0)P_0^{-1}\frac{\sqrt{(P_{in}P_0^{-1})^2 + \varepsilon} + P_{in}P_0^{-1}}{\sqrt{(P_{in}P_0^{-1})^2 + \varepsilon}}. \quad (14)$$

Из формулы (14) следует, что поверхностное натяжение уменьшает нормированной диаметр χ_m, но это влияние незначительно.

Заметим, что при раздутии капилляра не на всю его длину (т.е. когда $l_s < l$) максимально возможный нормированный диаметр $\hat{\chi}_m$ больше величины χ_m. При этом эти величины связаны соотношением:

$$\hat{\chi}_m \approx (l/l_s)(\chi_m - 1) + 1. \quad (15)$$

3.2. Шаговое раздутие с постоянной выдержкой на шаге подачи

Данный способ раздутия позволяет увеличить длину раздуваемого участка капилляра по сравнению с неподвижным раздутием. Примеры рассчитанных нормированных осевых профилей раздутых капилляров при $T_m = 1610$ °C и зависимостей избыточного давления в них от номера шага приведены на рис. 4. В расчётах параметр скорости нагрева был выбран $x_h = 3$ с, что соответствует времени нагрева 10–12 с (т.е. реальным оценкам времени нагрева).

Из приведённых кривых видно, что длины раздутых участков существенно больше ширины зоны раздутия. Чем больше выдержка на шаге $\Delta\tau$, тем больше максимум χ_m раздутого профиля, и тем круче он в дальнейшем спадает (рис. 4а). Это вызвано тем, что по мере поступления капилляра в зону раздутия давление внутри него уменьшается за счёт увеличения внутреннего объёма (рис. 4б).

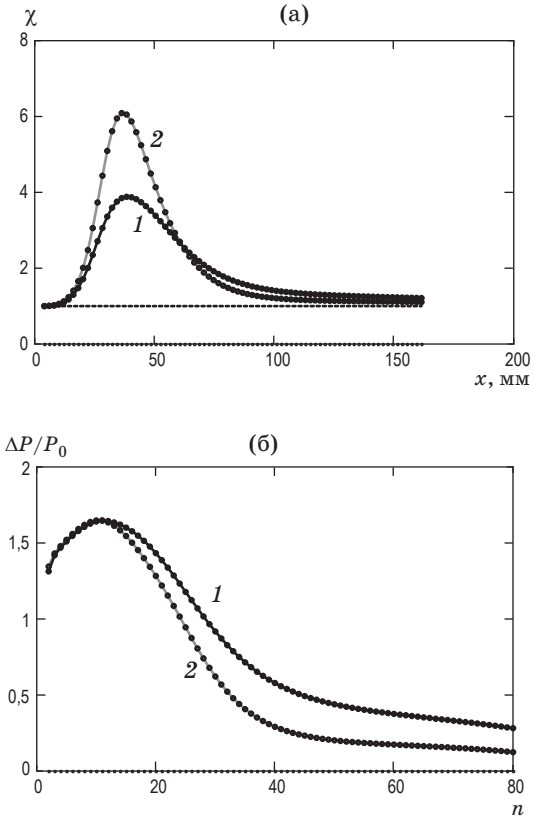

Рис. 4. Рассчитанные нормированные осевые профили (а) и зависимости избыточного давления внутри капилляра от номера шага подачи (б) для капилляров, раздутых при их шаговой подаче в ВТ печь с постоянными выдержками на шаге $\Delta\tau = 0{,}043$ (*1*) и $\Delta\tau = 0{,}051$ (*2*). Расчётные параметры: $D_0/d_0 = 1080/730$ мкм/мкм, $l = 250$ мм; $\sigma = 0{,}30$ Н/м, $T_m = 1610$ °C, $x_h = 3$ с.

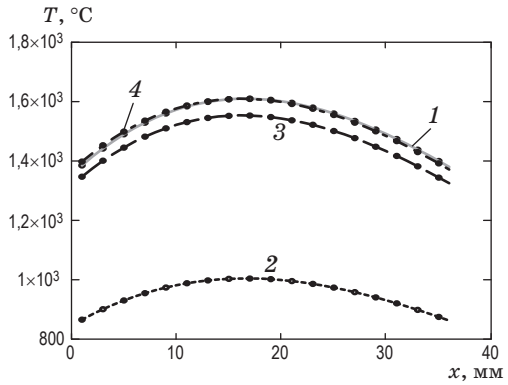

Рис. 5. Рассчитанные температурные профили раздуваемых дискретов капилляра при его шаговой подаче в ВТ печь с постоянной выдержкой на шаге. Кривая *1* — распределение температуры по раздуваемым дискретам при неподвижной фиксации капилляра в ВТ печи; *2*, *3* и *4* — усредненные (по времени выдержки) температурные профили раздуваемых дискретов на шагах $n = 1$, 3 и 5 соответственно. Расчётные параметры: $D_0/d_0 = 1080/730$ мкм/мкм, $l = 250$ мм; $\sigma = 0{,}30$ Н/м, $T_m = 1610$ °C, $x_h = 3$ с, $\Delta\tau = 0{,}051$.

На рис. 5. приведены расчётные кривые, иллюстрирующие влияние инерционности нагрева капилляра на усредненный температурный профиль его раздуваемого участка. На первых шагах подачи этот профиль монотонно растёт с увеличением номера шага, достигая своего квазистационарного распределения на шаге $n = 5$. При этом максимум этого профиля меньше, чем максимум стационарного профиля при неподвижном раздутии.

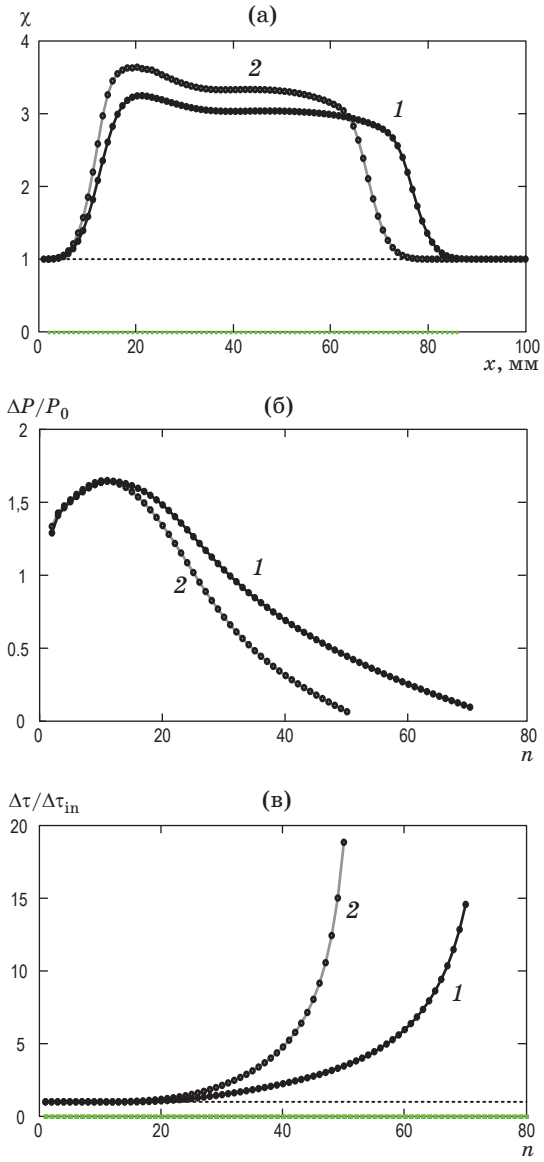

Рис. 6. Рассчитанные кривые, иллюстрирующие процесс раздутия капилляра при его шаговой подаче в ВТ печь с переменной выдержкой на шаге. (а) — осевые профили раздутых капилляров; (б) — зависимости избыточного давления внутри капилляра от номера шага подачи; (в) — зависимости относительной выдержки на шаге от номера шага подачи. Расчётные параметры: $D_0/d_0 = 1080/730$ мкм/мкм, $l = 250$ мм; $\sigma = 0{,}30$ Н/м, $T_m = 1610$ °C, $x_h = 3$ с. Кривые, помеченные индексом *1*, соответствуют начальной выдержке на шаге $\Delta\tau_{in} = 0{,}039$, индексом *2* – $\Delta\tau_{in} = 0{,}048$.

Заметим также, что дискретную подачу капилляра с постоянной выдержкой на шаге можно аппроксимировать подачей с постоянной скоростью $V_f = \Delta\Delta\tau^{-1}(\eta_m/P_0)^{-1}$.

3.3. Шаговое раздутие с переменной выдержкой на шаге подачи

Для формирования у раздуваемого капилляра более однородного осевого профиля надо на каждом шаге компенсировать уменьшение давления увеличением времени выдержки. В расчётах мы делали это в соответствие с соотношением $\tau_n = (\Delta P_{n-1}/\Delta P_n)\tau_{n-1}$, где τ_n и τ_{n-1} — относительные времена выдержки, а ΔP_{n-1} и ΔP_n — избыточное давление внутри капилляра на (n–1)-ом и n-ом шагах раздутия соответственно. Коррекцию вводили с шага $n = 8$–18.

Примеры рассчитанных нормированных осевых профилей капилляров для данного способа раздутия приведены на рис. 6. Из приведённых кривых видно, что профили раздутых участков вполне постоянны по длинам раздутия. Заметим, что на последних шагах раздутия ($n = 50$–70) время выдержки было увеличено в 10–15 раз по сравнению с его первоначальным значением.

3.4. Шаговое раздутие с постоянной выдержкой на шаге и с пошаговым изменением температуры ВТ печи

Величину относительного времени выдержки на шаге $\Delta\tau = \Delta t/(\eta_m/P_0)$ можно варьировать не только изменением физического времени Δt при постоянном значении температуры НЭ T_m (при постоянном значении вязкости расплава η_m), но и другим способом. А именно: пошаговым изменением вязкости расплава η_m (температуры НЭ T_m) при постоянном значении физического времени выдержки Δt в соответствии с соотношениями: $\eta_{m,n} = (\Delta P_n/\Delta P_{n-1})\eta_{m,n-1}$, $T_{m,n} = ER^{-1}\ln^{-1}(\eta_{m,n}/\eta_0) - 273$. С точки зрения анализа процесса данный режим раздутия эквивалентен рассмотренному выше режиму раздутия с переменной выдержкой на шаге при постоянной температуре нагрева. Отметим, что изменению относительного времени выдержки на шаге в 10–15 раз соответствует изменение температуры НЭ на 150–200 °C.

4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО РАЗДУТИЮ КАПИЛЛЯРОВ

Эксперименты по раздутию неподвижно фиксированных кварцевых капилляров в ВТ печи описаны в работе [4]. Здесь же приведены результаты экспериментов по раздутию капилляров с использованием различных вариантов подачи капилляра в ВТ печь. Использовалась ВТ печь с нагревательным элементом НЭ — 15/15 мм/мм, $T_m = 1600$–1700 °C. Исходные геометрические раз-

меры капилляров: D_0/d_0 = 1080/730 мкм/мкм, l = 250 мм. Для таких значений параметров начальное давление в капилляре и максимальный нормированный диаметр раздутия в соответствие с (11) и (15) принимают значения $P_{in} = (2{,}38–2{,}50)P_0$ и $\chi_m = 1{,}53–1{,}57$. Отметим также, что в указанном температурном интервале в силу достаточно высокой вязкости кварцевого стекла не наблюдалось удлинение раздуваемого капилляра под собственным весом, что важно с практической точки зрения.

4.1. Раздутие капилляра при постоянной скорости его подачи в ВТ печь

На рис. 7 и 8 приведены измеренные осевые профили капилляров, раздутых при различных температурах НЭ и различных скоростях подачи капилляра в ВТ печь. Все измерения диаметров капилляров были проведены на вытяжной установке измерителем диаметра волокна марки *BETA*, шаг измерений — 2 мм. Начальное положение капилляра в ВТ печи — нижний конец заподлицо с верхним торцом НЭ.

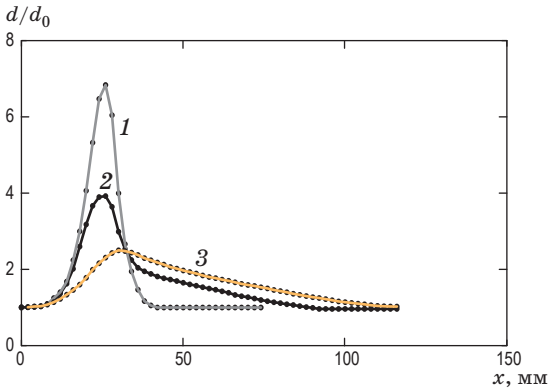

Рис. 7. Измеренные нормированные внутренние осевые профили капилляров $d(x)/d_0$, раздутых при одной и той же температуре T_m = 1640 °C, но при различных скоростях подачи капилляра: *1* — V_f = 2,5 мм/мин; *2* — V_f = 3,3 мм/мин, *3* — V_f = 5,0 мм/мин. Начальные размеры капилляров: D_0/d_0 = 1080/730 мкм/мкм, длина капилляра l = 250 мм, ход подачи — 100 мм.

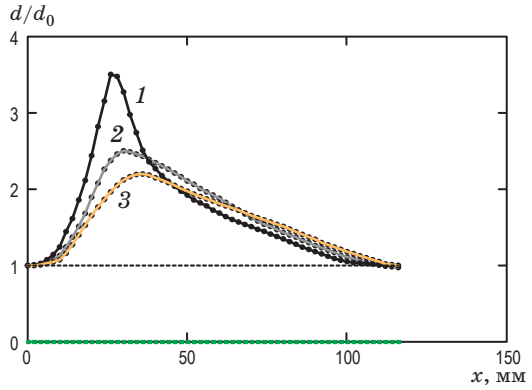

Рис. 8. Измеренные нормированные внутренние осевые профили капилляров $d(x)/d_0$, раздутых при постоянной скорости подачи в ВТ печь V_f = 10 мм/мин и различных температурах нагревательного элемента: кривая *1* получена при T_m = 1660 °C, кривая *2* — T_m = 1640 °C, кривая *3* — T_m = 1630 °C. Начальные размеры капилляров D_0/d_0 = 1080/730 мкм/мкм, длина капилляра l = 250 мм, ход подачи — 100 мм.

Из приведённых кривых видно, что чем больше температура НЭ и чем меньше скорость подачи, тем сильнее происходит раздутие и тем более неравномерно оно по длине. Качественно вид экспериментально измеренных профилей раздутых капилляров вполне аналогичен виду расчётных профилей. Близки друг к другу оказались также расчётные и экспериментальные параметры процесса раздутия (например, для кривой *1* на рис. 4). А усредненная расчётная скорость подачи капилляра составила $V_f \approx 20$ мм/мин (T_m = 1610 °C, $\Delta\tau = 0{,}043$, $\Delta = 2{,}02$ мм). Близкий же по форме профиль реального капилляра (кривая *3*, рис. 8) был получен при T_m= 1620 °C и V_f = 10 мм/мин.

4.2. Раздутие капилляра с переменной выдержкой на шаге подачи в ВТ печь

Заметим, что в экспериментах контроль давления внутри капилляра не проводился. Вследствие этого рассчитать априори пошаговую зависимость скорости подачи для формирования капилляра с требуемым значением χ_m не представлялось возможным. Поэтому мы использовали следующий алгоритм поиска этой зависимости. Сначала в экспериментах с постоянными скоростями подачи была подобрана скорость V_k, обеспечивающая раздутие капилляра с максимальным внутренним диаметром $(d_{\max}/d_0)^2 = \chi_m$. Пусть d_n — измеренный осевой профиль такого реперного капилляра и $n_{\max}$ — номер шага, соответствующий максимальному раздутию. По реперному профилю пошаговую зависимость скорости подачи задавали выражением:

$$V_{k.n} = \begin{cases} V_k, \text{если } n \le n_{\max} \\ \left(\left(\dfrac{d_n}{d_0}\right)^2 - 1\right)\left(\left(\dfrac{d_{\max}}{d_0}\right)^2 - 1\right)^{-1} V_k, \text{если } n > n_{\max} \end{cases}. \quad (16)$$

На рис. 9 приведён измеренный осевой профиль капилляра, раздутого указанным способом. Для реперной кривой *1* $d_{\max}/d_0 \approx 2{,}2$, $n_{\max} = 18$, поэтому при формировании кривой *2* первые 36 мм хода подачи капилляра прошли при начальном значении скорости подачи V_f = 10 мм/мин. Затем через каждые 2 мм хода скорость подачи изменяли в соответствии с указанным выше соотношением. Видно, что раздутый профиль с коррекцией скорости подачи оказался вполне однородным. Заметим, что к концу раздутия скорость подачи была уменьшена примерно в 8 раз.

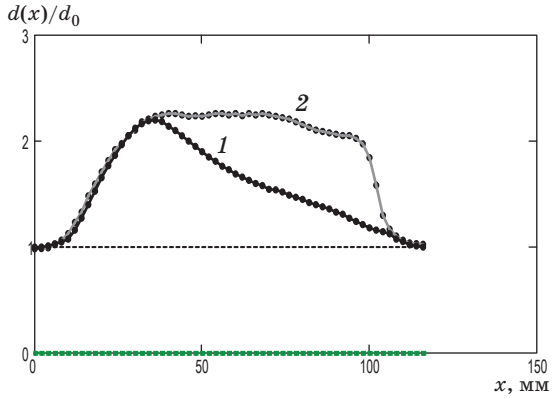

Рис. 9. Измеренные нормированные внутренние осевые профили капилляра $d(x)/d_0$, раздутого при температуре T_m= 1640 °C с переменной скоростью подачи при начальном её значении $V_{f,in}$ = 10 мм/мин — кривая *1*. Для сравнения приведён осевой профиль капилляра, раздутого с постоянной скоростью подачи V_f = 10 мм/мин — кривая *2*. Начальные размеры капилляров D_0/d_0 = 1080/730 мкм/мкм, длины капилляра l = 250 мм, ход подачи —100 мм.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулируем основные результаты работы:

1. С помощью дискретной модели запаянного кварцевого капилляра численными методами проанализированы два режима его раздутия — при неподвижной фиксации капилляра в ВТ печи и при его пошаговой подаче в ВТ печь с постоянной и переменной выдержками на шаге. Изучено влияние времени нагрева капилляра на кинетику его раздутия.

2. Показано, что для получения равномерного осевого профиля по всей длине раздуваемого участка капилляра надо использовать режим с переменной выдержкой на шаге или режим с постоянной выдержкой на шаге и пошаговым изменением температуры нагревательного элемента.

3. Полученные теоретические результаты были подтверждены экспериментами по раздутию кварцевых капилляров для капиллярных сборок — заготовок микроструктурированных оптических волокон.

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. № 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. № 6. P. 1092–1102.

3. *Russel R.St.J.* Photonic-crystal fibers // J. Lightwave Technol. 2006. V. 14. № 12. P. 4729–4747.

4. *Замятин А.А., Маковецкий А.А.* Раздутие капилляров в капиллярных сборках // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 1. С. 66–72.

5. *Маковецкий А.А.* Дискретная модель раздутия запаянного капилляра в высокотемпературной печи с неравномерным осевым температурным профилем // Прикладная механика и техническая физика (ПМТФ). 2011. Т. 52. № 6. С. 5–12.

6. *Urbain G., Bottinga Y., Richet P.* Viscosity of liquid silica, silicates and alumino-silicates // Geochim Cosmochim Acta. 1982. V. 46. P. 1061–1072.

7. *Ojovan M.I., Lee W.E.* Viscosity of network liquids within Doremus approach // J. of Appl. Phys. 2004. V. 95. № 7. P. 3803–3810.

8. *Boyd K., Ebendorff-Heidepriem H., Monro T.M., Munch J.* Surface tension and viscosity measurement of optical glasses using a scanning CO_2 laser // Optical Materials Express. 2012. V. 2. № 8. P. 1101–1110.