

УДК 525.51 : 532.522

**ФИЗИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ЗОНЫ ПЕРЕТЯЖКИ
«ЗАГОТОВКА—СВЕТОВОД»
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМАХ ВЫТЯЖКИ**

*Е. М. Дианов, В. В. Кашин, С. М. Перминов, В. Н. Перминова,
С. Я. Русанов, В. К. Сысов*

Методами численного моделирования задач о движении жидкости со «свободной границей» к проблеме перетяжки кварцевой заготовки в световод определены области параметров, в которых существует непрерывный процесс вытяжки; построена соответствующая диаграмма режимов. При исследовании отклика процесса на флуктуации основных параметров определена область, где такие флуктуации не приводят к обрыву световода и которая, следовательно, пригодна для реальной работы. Исследованы динамические свойства процесса при работе внутри этой области.

Изготовление волоконных световодов связано со многими интересными физическими проблемами. В частности, одной из таких проблем является вопрос о физике поведения зоны перетяжки между заготовкой и световодом, так называемой «луковицы». Дело в том, что именно в зоне формирования световода закладываются все его будущие характеристики и от характера поведения этой зоны зависят его оптические, прочностные и другие свойства [1, 2]. Например, весьма существенным образом это поведение влияет на равномерность диаметра световода по его длине.

Проблема изучения физики поведения луковицы распадается на три основных вопроса. Во-первых, хорошо известно [3, 4], что не при всех сочетаниях параметров вытяжки (под таковыми мы подразумеваем скорости подачи заготовки и вытяжки световода v_0 и v_c , вводимую тепловую мощность, длину зоны прогрева заготовки L , диаметры световода и заготовки $2a_c$ и $2a_0$) возможна непрерывная вытяжка световодов. При некоторых сочетаниях параметров оттянутый световод быстро обрывается из-за недогрева или перегрева зоны перетяжки, при других сочетаниях вытяжка возможна. Таким образом, очевидно, что в пространстве этих параметров существуют области, «разрешенные» и «запрещенные» для вытяжки. Знание областей существования безобрывных режимов вытяжки чрезвычайно важно для практической работы. Тем не менее в литературе, посвященной изготовлению волоконных световодов, этот вопрос практически не освещался.

Во-вторых, для практической работы весьма важно знать, какая именно часть области существования безобрывной вытяжки является наиболее благоприятной для работы. И в-третьих, интересы задач управления и автоматизации процесса для получения световодов с минимальными вариациями диаметра требуют достаточно точных знаний о динамике поведения луковицы при работе в этой благоприятной зоне параметров, в случае если эти параметры претерпевают разного рода флуктуации.

Настоящая работа посвящена изучению трех этих вопросов. При нашем исследовании использовалось численное моделирование, поскольку экспериментальное исследование этих вопросов чрезвычайно трудоемко и в ряде случаев невозможно.

Перетяжка расплавленного кварцевого стекла из заготовки в световод рассматривалась ранее в ряде работ [5-9]. Результаты этих работ показывают, что задача об определении области существования безобрывной вытяжки в пространстве параметров не может быть решена успешно, если не учитывать действие сил поверхностного натяжения и гравитации, а также сложного поведения поля температур внутри луковичы. В стационарном случае вопрос о форме зоны перетяжки рассмотрен в работах [6, 9]. Однако для исследования поставленных выше вопросов необходимо знание динамики луковичы, т. е. расчет нестационарного случая.

В настоящей работе перетяжка кварцевого стекла в световод рассматривалась как нестационарное осесимметричное вертикальное течение сильновязкой жидкости, ограниченное так называемой «свободной поверхностью» [9, 10], т. е. поверхностью, не соприкасающейся с каким-либо твердым телом. Поведение этого течения описывается следующей системой гидродинамических и теплофизических уравнений:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \eta(T) \left[\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{u}{r^2} \right] + \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \right) \eta(T) \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \right) u, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + g + \eta(T) \left[\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right] + \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \right) \eta(T) \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \right) v, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u}{r} = 0, \quad \frac{\partial a}{\partial t} = -v \frac{\partial a}{\partial z} + \frac{v}{r}, \quad (3), (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial r} + v \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{1}{\rho C_p} \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \right) k(T) \left(\frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \right) T + \frac{1}{\rho C_p} (k) T \left[\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] T. \quad (5)$$

Здесь z — ось, направленная вдоль оси вытяжки; ось r направлена перпендикулярно ей; v , u — соответственно продольная и поперечная компоненты скорости расплавленного кварцевого стекла; T — его температура; $\eta = \eta(T)$ — его вязкость, причем зависимость вязкости от температуры аппроксимировалась в соответствии с [11]; $a(z, t)$ — форма зоны перетяжки; P — давление; g — ускорение свободного падения; ρ , C_p — плотность и теплоемкость вещества; $k(T)$ — его теплопроводность, которая учитывает теплопередачу за счет излучения [6] и, следовательно, зависит от температуры. Уравнения (1)–(3) есть уравнения Навье—Стокса течения вязкой несжимаемой жидкости, (4) — уравнение свободной поверхности, (5) — уравнение теплопередачи. Решение задачи существенно осложняется тем, что при перетяжке кварцевого стекла налицо чрезвычайно большие градиенты вязкости — на расстоянии, не превышающем нескольких сантиметров, имеют место перепады вязкости от 10^4 до 10^{20} пуаз [11].

Поскольку рассматривалось течение сильновязкой жидкости, авторы использовали в соответствии с [3, 6] следующие приближения: считалось, что продольная скорость зависит только от z , а давление выражается следующим образом:

$$P = -\frac{\alpha}{r^2} - \frac{\eta(T)}{\rho} \frac{\partial v}{\partial z} \quad \text{или} \quad P = -\frac{\alpha}{H} - \eta(T) \rho \frac{\partial v}{\partial z}, \quad (6)$$

где α — коэффициент поверхностного натяжения, H — кривизна поверхности [6].

Граничные условия для указанной системы уравнений выглядят следующим образом:

$$v|_{z=0} = v_0, \quad v|_{z=z_1, z_1 \gg z_0} = v_0, \quad (7)$$

$$a|_{z=0} = a_0, \quad \frac{\partial a}{\partial z} \Big|_{z_N, z_N \gg z_1} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z_N, z_N \gg z_1} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=a} = \frac{1}{k(T)} \left[h(z)(T - T_0) + a' \frac{\partial T}{\partial z} + \varepsilon \sigma (T^4 - T_0^4) \right] \times \\ \times \frac{a(z)}{a_0} (1 + (a')^2)^{-1/2}, \quad a' = \frac{\partial a}{\partial z}, \quad (10)$$

где $T_0 = 293$ К; при $z_1 - L/2 \leq z \leq z_1 + L/2$ $T_0 = T_1$. Таким образом, мы считали фиксированными скорости подачи заготовки v_0 , вытяжки световода v_c , радиус заготовки a_0 ; расчет велся при $0 < z < z_N$, где $z_N \gg z_1$, z_1 — координата центра нагревателя и радиус световода после z_N можно считать неизменным. Граничное условие для уравнения теплопередачи (10) включает в себя условие ввода тепла в заготовку. В данном случае прогрев ведется в нагревателе длины L , имеющем температуру T_1 . Коэффициент теплоотдачи, позволяющий учесть конвективное охлаждение $h(z)$, вычисляется по методике, изложенной в работах [5, 6]. σ есть постоянная Стефана—Больцмана, ε — излучательная способность кварца [5, 6], соответствующий член в уравнении (10) позволяет учесть остывание или нагрев зоны перетяжки за счет теплового излучения.

Задача (1)—(10) решалась на подвижной, адаптированной к форме границы сетке размером 60×10 по неявным схемам чередующихся направлений. Подробно методика расчета изложена в работе [12]. В качестве начальных данных мы брали форму зоны перетяжки, аппроксимированную, согласно [5], аналитической функцией, и следили, как она деформируется при различных режимах вытяжки. Вытяжка считалась вышедшей на стационарный режим в том случае, если изменение радиуса вытягиваемой нити составляло $\leq 10^{-5}$ см/с.

Диаграмма режимов вытяжки

При решении поставленной выше задачи были промоделированы все известные экспериментально ситуации при вытяжке [4].

Стационарный режим вытяжки. На рис. 1, а представлена серия портретов луковицы, полученных через некоторые интервалы времени, начиная с момента помещения заготовки в нагреватель. Они демонстрируют установление стабильного режима вытяжки, после чего форма зоны перетяжки практически не меняется.

Режим капиллярной неустойчивости. В случае перегрева зона перетяжки приобретает совершенно другую форму, луковица укорачивается, «оплывает», становится схожа с луковицей, получаемой при лазерной вытяжке [13]. Затем оплывание продолжается, и в некоторый момент, когда действие сил поверхностного натяжения начинает превышать уменьшившееся вязкое трение, происходит разбегание световода на капли — обрыв в результате так называемой капиллярной неустойчивости. Эта ситуация отражена в серии портретов зоны перетяжки на рис. 1, б.

Режим вязкого разрушения. При недогреве луковицы обрыв происходит вследствие вязкого разрушения, так как к шейке луковицы не успевают поступать запасы достаточно горячего (и жидкого) вещества. Диаметр световода резко уменьшается и происходит его обрыв. Эта ситуация отражена на рис. 1, в.

Отличие форм зоны перетяжки при перечисленных ситуациях хорошо видно на рис. 2, где они представлены в масштабе, сильно растянутом по оси r . Кривая 1 на этом рисунке соответствует форме луковицы в начале вытяжки. Кривая 2, которая весьма сильно от нее отличается, соответствует установившемуся стационарному режиму. Кривая 3 демонстрирует оплывшую, укороченную луковицу в момент, предшествующий капиллярному распаду. Кривая 4 — недогретая зона перетяжки, хорошо видно наметившееся место вязкого разрушения.

Отметим, что употребляемые нами термины «недогрев» и «перегрев» связаны не только с величиной температуры нагревателя, но и со всем комплексом параметров вытяжки. Например, ситуация «перегрева» может возникнуть при относительно невысокой температуре нагревателя, если достаточно велика его длина и заготовка подается в зону нагрева с маленькой скоростью [14].

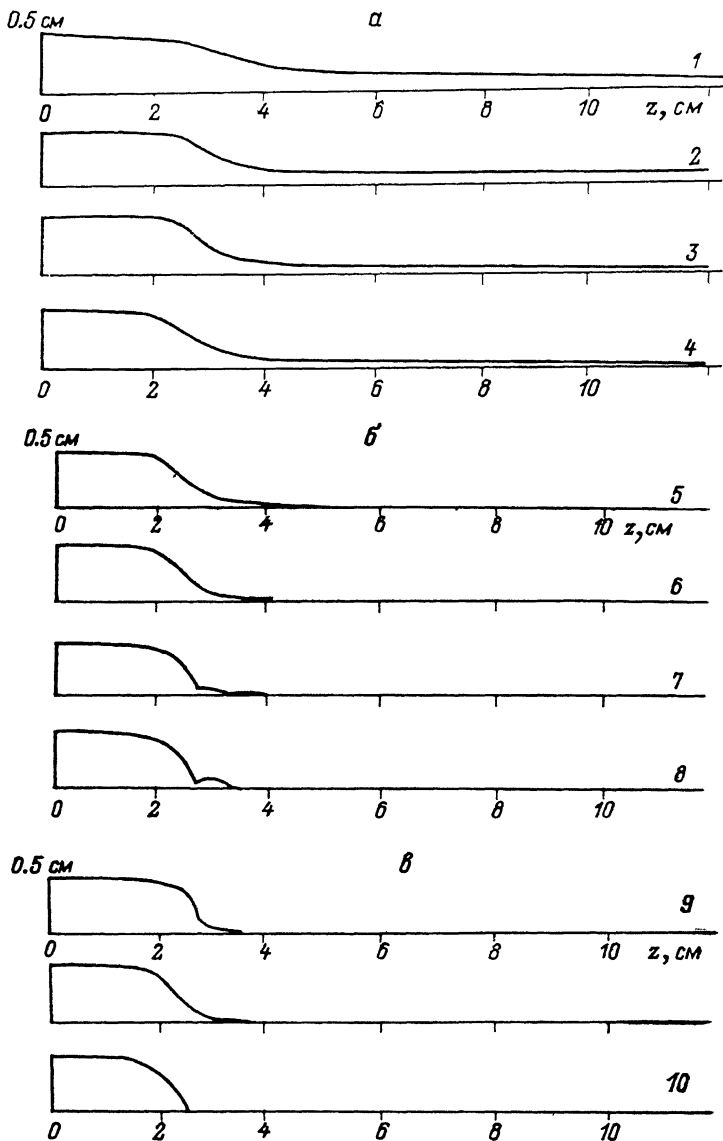


Рис. 1. Рассчитанные формы зоны перетяжки «заготовка—световод» через различные промежутки времени с момента помещения в нагреватель.

$L=4.5$ см, $2a_0=1$ см, $2a_0=100$ мкм, $v=12$ м/мин. *a* — выход на стационарный режим при $T_1=2400$ К, *б* — капиллярный распад световода при перегреве $T_1=2700$ К, *в* — вязкое утоньшение и обрыв световода при недогреве $T_1=2000$ К. 1 — $t=25$, 2 — 40, 3 — 82, 4 — 122, 5 — 157, 6 — 167, 7 — 168, 8 — 169, 9 — 181, 10 — 196, 11 — 226 с.

Таким образом, в пространстве параметров вытяжки была определена область существования безобрывной вытяжки и построена соответствующая диаграмма режимов. На рис. 3, *a* показано сечение пространства параметров плоскостью (T_1, v_c) . Данные, представленные на этом рисунке, соответствуют вытяжке в нагревателе длиной 4.5 см из заготовки диаметром 1 см световода диаметром 100 мкм. Как видно из рис. 3, *a*, эту область пространства параметров вытяжки можно условно разбить на три основных части. Зона *A* соответствует капиллярному распаду световода в результате перегрева луковицы, зона *B* —

вязкому разрушению в результате недогрева. В зоне *C* возможна безобрывная вытяжка. С увеличением скорости вытяжки для достижения стабильного режима необходима все большая и большая температура нагревателя.

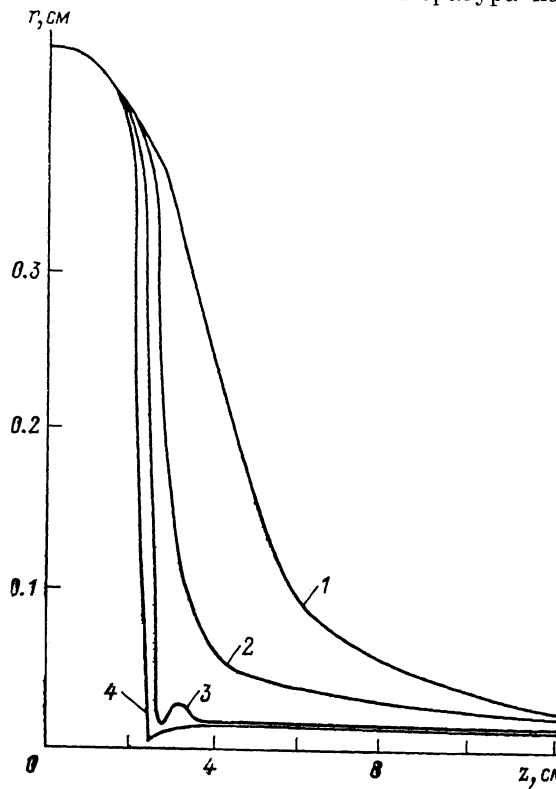


Рис. 2. Различные формы зоны перетяжки.

Поведение диаграммы режимов при малых и больших скоростях вытяжки обсудим качественно. В область малых скоростей границы области *C* можно экстраполировать, как показано пунктиром, и в пределе мы получим две край-

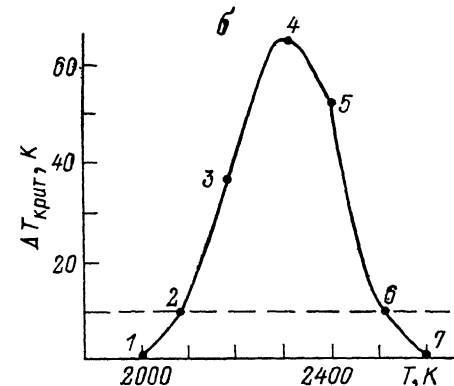
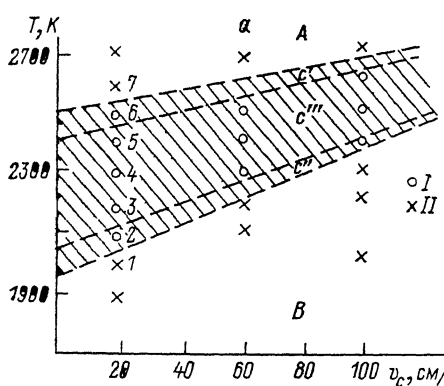


Рис. 3.

a — диаграмма режимов вытяжки. Штриховкой помечена область безобрывной вытяжки. *I* — стационарный режим, *II* — обрыв; *б* — величина критических флуктуаций температуры нагревателя для различных режимов вытяжки. Точки 1—7 соответствуют тем же точкам на рис. 3, *a*.

ные ситуации. При температуре нагревателя выше критической (2500 К) практически неподвижная заготовка «оплывает» в виде капли, что делает вытяжку невозможной. При температуре ниже 1900 К, несмотря на практическую неподвижность, заготовка прогрета настолько слабо, что вытяжка световода

опять-таки невозможно. Промежуточные режимы вытяжку допускают. При больших скоростях вытяжки в чрезвычайно горячем нагревателе возникает ситуация, характеризующаяся сильным перепадом температур между поверхностью и центром луковицы. Зона перетяжки представляет собой как бы относительно холодный сильновязкий «сердечник», покрытый тонким слоем очень горячего жидкого вещества. Такой режим одновременно характеризуется возрастанием роли вязкого трения в основном объеме луковицы и возрастанием роли сил поверхностного натяжения вблизи шейки зоны перетяжки. Такая ситуация одновременно близка к «перегретому» и «недогретому» режимам. Поэтому можно предположить, что при больших v_c границы зон A и B все больше сближаются и в пределе сходятся. Тогда область C существования безобрывной вытяжки принимает форму криволинейного треугольника.

Подчеркнем еще раз, что диаграмма режимов (рис. 3, a) соответствует конкретным значениям L , a_0 , a_c . Увеличение, например, параметра L , приводит к сдвигу границ области вниз. Таким образом, существует целая сетка диаграмм такого рода, их основные закономерности соответствуют описанным выше.

Благоприятные режимы вытяжки

Выше была описана область параметров вытяжки, в которой существует безобрывная перетяжка заготовки в световод. Требуется решения вопрос, какая именно часть этой области может считаться наиболее удобной для работы. Для выяснения этого вопроса была исследована устойчивость¹ режимов из области C к внезапным изменениям параметров вытяжки, которые неизбежны при реальной работе.

Численный эксперимент проводился следующим образом. После установления режима стабильной вытяжки, соответствующего той или иной точке в области C , один из параметров v_c или T_1 изменялся скачком на заданную величину. При этом форма зоны перетяжки начинала изменяться. Если не происходило обрыва, то эксперимент повторялся заново с увеличенной амплитудой скачка параметра v_c или T_1 . Таким образом определялась критическая величина Δv_c или ΔT_1 , при которой в данном режиме наступает обрыв световода. На рис. 3, b приведена зависимость критической величины ΔT_1 для различных значений T_1 при скорости вытяжки $v_c = 12$ м/мин, т. е. результат исследования устойчивости режимов, расположенных на вертикальной прямой в широкой части области C . Точки, в которых были проведены расчеты, отмечены на рис. 3, a цифрами 1—7. Кривая $\Delta T_1(T_1)$ имеет гауссовскую форму, и мы видим, что в пограничных областях C' и C'' достаточно весьма небольших флуктуаций температуры нагревателя, чтобы прервать процесс вытяжки, тогда как в центре области изменение T_1 на 100 К не приводит к обрыву, а выводит на новый стационарный режим. Аналогичный вид имеет зависимость $\Delta v_c(v_c)$, при работе вблизи центра зоны C режим может выдержать даже пятикратное увеличение скорости вытяжки. Таким образом, по некоторому уровню критических для режима флуктуаций (например, 10 К) область C может быть разбита на три: неустойчивые C' и C'' и устойчивую центральную C''' . Наиболее благоприятным для работы следует считать режим, соответствующий зоне C''' и находящийся по возможности близко к ее середине.

Динамика поведения зоны перетяжки при воздействии внезапного изменения параметров вытяжки

Интересы управления процессом и его автоматизация требуют знания основных закономерностей динамического поведения луковицы при работе в благоприятном режиме. Поэтому нами исследовался отклик двух взаимосвязанных параметров — температуры и диаметра зоны перетяжки — при внезапном изменении температуры нагревателя на 100 К или скорости вытяжки в 5 раз. В качестве начальных данных был использован один из устойчивых режимов,

¹ Под «устойчивостью» здесь и ниже мы понимаем способность к образованию световода без обрыва, а не стабильность получаемого a_c .

полученный вблизи центра зоны C ($v_c=20$ см/с, $T_1=2300$ К). Фиксировались значения температуры на поверхности и диаметра зоны перетяжки в пяти сечениях: $z=3.9, 5.9, 7.9, 9.9, 11.9$ см (рис. 1) в течение некоторого времени после внезапного изменения параметра. На рис. 4 представлены результаты численного эксперимента для воздействия по каналу тепла (а) и каналу скорости (б). Из анализа этих результатов можно сделать следующие выводы. Температура и диаметр световода меняются практически синхронно. Увеличение температуры зоны перетяжки вызывает понижение вязкости кварцевого

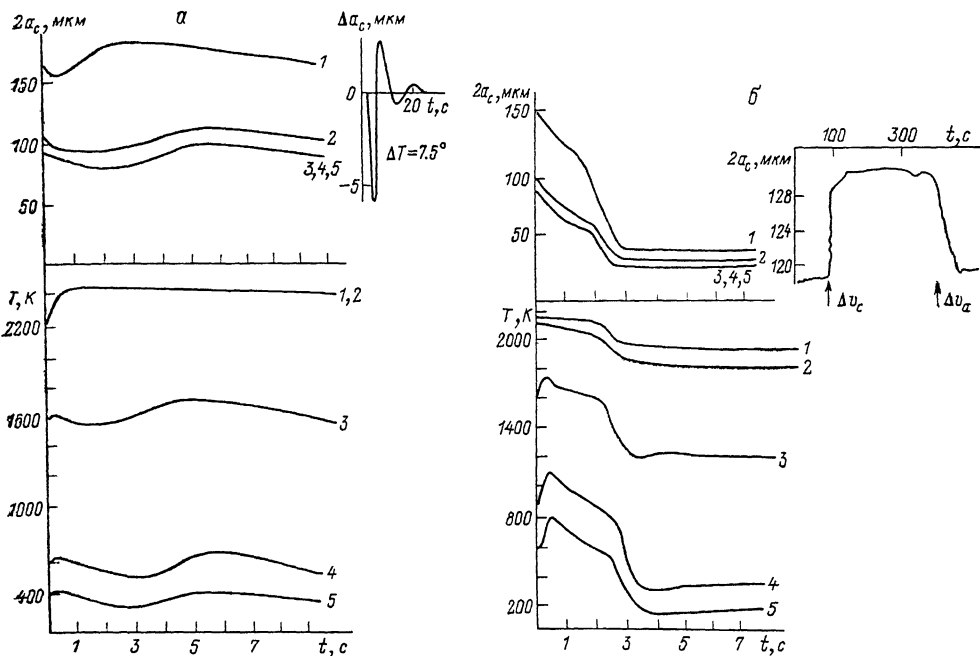


Рис. 4. Динамический отклик радиуса и температуры зоны перетяжки в пяти сечениях на внезапное увеличение температуры нагревателя (а) и скорости вытяжки (б).

1 — $z=3.9$, 2 — 5.9 , 3 — 7.9 , 4 — 9.9 , 5 — 11.9 см.

стекла в этой точке и усиление роли сил поверхностного натяжения, «сдавливающих» световод. Это вызывает уменьшение диаметра, что в свою очередь приводит к усиленному остыванию световода, возрастанию вязкости и обратному утолщению (обратный ход кривой). Данные численного эксперимента вполне соответствуют ходу экспериментальных кривых, полученных при соответствующих условиях [15-17]. На врезке к рис. 4 представлены данные, позволяющие сравнить наши результаты с результатами работ [15, 16]. Далее мы видим, что процессы установления при вытяжке световодов с помощью печи достаточно низкочастотны и в том и в другом случае (доли герца, в крайнем случае единицы герца), что также вполне соответствует имеющейся литературе.

Заключение

В настоящей работе на основе применения методов численного моделирования задач о движении жидкости со «свободной границей» к проблеме перетяжки кварцевой заготовки в световод определены области параметров вытяжки, где последняя возможна без обрыва. Построена соответствующая диаграмма режимов. Определена наиболее благоприятная для работы область, где процесс не обрывается в результате достаточно больших флуктуаций основных параметров. Исследованы динамические свойства процесса при работе в этой области. Результаты настоящей работы при знании точных параметров вытяжных установок могут служить основой для создания высокоэффективных автоматизированных систем управления процессом изготовления световодов.

Авторы выражают благодарность В. Б. Сулимову за ценные консультации и В. А. Добровольскому за предоставление программ графической обработки.

Литература

- [1] *Yoshida K., Sentsui S., Shii H., Kuroha T.* Conference on Integrated Optics and Optical com., Tokyo, 1977, v. B9-3, p. 327—330.
- [2] *Schornchorn H., Vazirani H. N., Fresch H. L.* Appl. Phys., 1978, v. 49, N 7, p. 128—132.
- [3] *Geyling F. T.* Bell Syst. Techn., 1976, v. 55, N 8, p. 1011—1056.
- [4] *Jaeger R. E.* In: Optical Fiber Telecommunications. N. Y.: Academic Press, 1979, p. 170—200.
- [5] *Homsy G. H., Walker K.* Glass Technology, 1979, v. 20, N 1, p. 20—26.
- [6] *Pack V. C., Runk R. B.* J. Appl. Phys., 1978, v. 49, N 8, p. 4417—4422.
- [7] *Колпациков В. Л., Ланин Ю. И., Мартыненко О. Г., Шнип А. И.* ЖПМТФ, 1986, № 3, с. 105—112.
- [8] *Фойгель А. В.* Препринт ИРЭ, № 14. 1977. М., с. 28.
- [9] Энергоперенос в конвективных потоках. Сборник / Под ред. Мартыненко О. Г. и др. Минск, 1985, с. 3—76.
- [10] *Гущин В. А., Коньшин В. Н.* Численное моделирование волновых движений жидкости. ВЦ АН СССР. Сообщения по прикладной математике. М., 1985, с. 36.
- [11] Стекланные волокна / Под ред. Аслановой М. С. М.: Химия, 1979, с. 255.
- [12] *Кашин В. В., Перминов С. М., Перминова В. Н.* и др. Препринт ИОФАН, № 238. М., 1986, с. 72.
- [13] *Дианов Е. М., Ионов В. Н., Кашин В. В.* и др. Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, № 8, с. 473—477.
- [14] *Перминов С. М., Перминова В. Н., Сысоев В. К.* Препринт ИОФАН, № 264. М., 1986, с. 22.
- [15] *Payne D. N., Gambling W. A.* Ceramic Bulletin, 1976, v. 55, N 2, p. 195—197.
- [16] *Gourgonek A., Regreny A.* II National Symposium, Poland, Jablonna, 1979, v. III, p. 19—42.
- [17] *Nakahara H., Sakaguchi S., Miyashita T.* Rev. Electrical Com. Lab., 1978, v. 26, N 3—4, p. 476—483.

Институт общей физики
АН СССР
Москва

Поступила в Редакцию
10 декабря 1986 г.