

На правах рукописи

**Шабарова Любовь Васильевна**



**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТЕРМОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ПРИ ВЫТЯЖКЕ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ**

Специальность 01.02.06 – динамика, прочность машин,  
приборов и аппаратуры

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Нижний Новгород - 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Нижегородский государственный университет им.Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор  
Новиков Валерий Вячеславович

Официальные оппоненты: Кириллов Юрий Павлович,  
доктор технических наук, институт химии  
высокочистых веществ им. Г.Г. Девярых  
РАН, старший научный сотрудник

Кочетков Анатолий Васильевич,  
доктор физико-математических наук, про-  
фессор, НИИ механики Нижегородского  
государственного университета им. Н.И.  
Лобачевского, главный научный сотруд-  
ник

Ведущая организация: Институт проблем точной механики и  
управления РАН, Саратов

Защита состоится 17 октября 2013 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.09 при Нижегородском государственном университете по адресу: 603950, ГСП 1000, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп.6.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

Автореферат разослан 16 сентября 2013 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

 Горохов В.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Актуальным направлением оптоэлектроники и волоконной оптики является развитие технологии и изучение свойств волоконных световодов, прозрачных в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне (0.8 – 25 мкм). Световоды, работоспособные в этой спектральной области, изготавливаются из стекол на основе оксидов тяжелых металлов (теллуритные), фторидов металлов (фторидные), халькогениднов элементов (халькогенидные). Волокна из этих стекол изготавливают вытяжкой расплава из тигля, одинарного или двойного, и из двухслойной цилиндрической преформы, монолитной или сборной. Волоконный световод, работающий по принципу полного внутреннего отражения, представляет собой протяженную двухслойную нить. У сердцевины световода показатель преломления выше, чем у отражающей оболочки. Требования к параметрам волоконных световодов включают заданный абсолютный и относительный диаметр световедущей сердцевины, его постоянство по длине волокна, высокую механическую прочность, отсутствие гетерофазных включений в стекле сердцевины. Материальным объектом исследования в данной работе являются волоконные световоды из теллуритных стекол.

Практика изготовления теллуритных световодов вытяжкой расплава из тигля выявила ряд сложностей, связанных с особенностями расплавов стекол. Это крутая зависимость вязкости от температуры, низкая теплопроводность, склонность к кристаллизации при рабочих температурах вытяжки, повышенная летучесть диоксида теллура, способствующая возникновению свилей в стекле. Дополнительные трудности при разработке оптимизированного процесса вытяжки обусловлены недостаточной изученностью физико-химических свойств теллуритных стекол и их расплавов. Все это требовало изучения свойств теллуритных расплавов, характера их течения в тигле и фильере тигля в процессе вытяжки, адаптации последнего под свойства данного расплава. Плодотворным представлялось при этом сочетание методов физического и численного эксперимента. В некоторых случаях численный эксперимент был единственным способом получения необходимых зависимостей и информации.

**Целью** настоящей диссертационной работы является развитие и внедрение методов вычислительного эксперимента в задачи технологии оптических волокон из расплавов стекол, склонных к кристаллизации, и содержащих макрокомпонент с повышенной летучестью (халькогенидных и теллуритных стекол).

В соответствии с изложенной целью в работе поставлены и решены следующие задачи:

– разработка методики моделирования течения расплава стекла при вытяжке волокон из фильеры двойного тигля с применением технологий вычислительной гидрогазодинамики на высокопроизводительных вычислительных узлах;

– выявление методами вычислительного эксперимента характера и масштаба влияния геометрических и физико-механических факторов на течение струи в процессе вытяжки волокна и качество получаемого волокна;

– разработка и применение расчетно-экспериментальных методик определения вязкости, теплопроводности и теплоемкости расплавов теллуридных стекол в температурном диапазоне изготовления волокон из этих расплавов;

– формирование новых способов получения волокон, адаптированных к особенностям теллуридных стекол.

**Научная новизна работы** заключается в применении суперкомпьютерных технологий вычислительного эксперимента, базирующихся на современных пакетах вычислительной гидрогазодинамики, для отработки конструкции устройств и режимов вытяжки волокон из расплавов стекол. По результатам вычислительных экспериментов дан ряд рекомендаций по усовершенствованию этих устройств. С использованием технологий вычислительного эксперимента и результатов физических экспериментов определены вязкость, теплопроводность и удельная теплоемкость теллуридных стекол в рабочем диапазоне температур, при получении волокон из расплавов данных стекол. В отечественной и зарубежной литературе данные по вязкостным и тепловым свойствам теллуридных стекол в рабочем диапазоне температур получения волокон отсутствуют.

**Практическая значимость и реализация результатов работы.** Разработанная методика моделирования течения расплавов и воздуха при вытяжке волокон из фильеры двойного тигля позволяет на предпроектных и проектных стадиях разработки перспективных устройств по вытяжке волокон проводить виртуальную отработку этих устройств. Применение предлагаемой методики повышает уровень обоснованности проектно-технологических решений, позволяет использовать результаты математического моделирования для физической диагностики факторов, приводящих к снижению качества получаемых в результате вытяжки волокон.

Разработаны расчетно-экспериментальные методики, позволяющие определять вязкостные и тепловые свойства расплавов, в том числе расплавов теллуридных стекол, в диапазоне рабочих температур вытяжки из них волокон. Наличие достоверных данных по вязкости, теплопроводности, теплоемкости

конкретных расплавов является необходимым условием для формирования технологической процедуры получения из этих расплавов качественных волокон.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается решением тестовых задач, соответствием результатов расчетов по предложенным алгоритмам с точными решениями, валидацией расчетно-экспериментальных методик на известных вязкостных и тепловых характеристиках расплавов олова и халькогенидного стекла.

**На защиту выносятся:**

- результаты работы по выбору расчетных схем для проведения вычислительных экспериментов, ориентированных на моделирование течений расплавов и воздуха при вытяжке волокон из фильеры двойного тигля;
- результаты применения методики по моделированию течения расплавов и воздуха при вытяжке волокон из различных фильер двойного тигля;
- расчетно-экспериментальные методики определения вязкости, теплоемкости, теплопроводности расплавов стекол и результаты верификации этих методик;
- рекомендации по технологическим процедурам вытяжки и схемам устройств, предназначенных для вытяжки волокон из расплавов халькогенидных и теллуридных стекол.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на восьми всероссийских и четырех региональных конференциях и семинарах и отмечены дипломами за лучшие выступления:

1. Шестая всероссийская молодежная школа-конференция «Лобачевские чтения 2007», Диплом за лучший доклад.
2. Четырнадцатая Нижегородская сессия молодых ученых (технические науки), 2009 г. Отмечена за высокий уровень.
3. Четырнадцатая Нижегородская сессия молодых ученых (математические науки, 2009 г. Диплом 2-ой степени.
4. Шестнадцатая Нижегородская сессия молодых ученых (математические науки), 2011 г., Диплом 2 степени

**Благодарности.** Автор благодарен за ценные указания и обсуждение полученных результатов доктору хим. наук, профессору, действительному члену РАН Чурбанову М.Ф. и кандидату хим. наук Снопатину Г.Е. Особую благодарность за помощь в проведении физических экспериментов автор выражает кандидату химических наук Сметанину С.В.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 12 работ, из которых 5 статей, в том числе 4 – из перечня ВАК.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем составляет 175 стр., включая 82 рисунка, 10 таблиц, библиографию, содержащую 60 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы диссертационного исследования, рассматриваются области применения оптических волокон изготовленных из расплавов теллуритных стекол, формулируются основные проблемы получения качественных световодов из исследуемых стекол, а так же ставится цель и задачи настоящей работы.

**В первой главе** рассмотрена классификация оптических волокон, изложены способы их получения и приведен обзор известных исследований, посвященных математическому моделированию процесса получения волокон методом вытяжки.

Системное применение технологий вычислительного эксперимента для решения различных задач вытяжки волокон позволяет выявить три результативных направления применения этих технологий в рассматриваемых задачах. Во всех этих направлениях вычислительный эксперимент эффективно дополняет физический.

Первое направление - это использование подходов вычислительного эксперимента для решения обратных задач по определению физических свойств расплавов. Вычислительный эксперимент позволяет по результатам проведенных физических экспериментов определить не только физические свойства расплавов - вязкость, теплопроводность, теплоемкость, но и характер течения рассматриваемого расплава стекла при данной температуре.

Второе направление - использование результатов математического моделирования для физической диагностики факторов, приводящих к снижению качества получаемых в результатах вытяжки волокон. Сопоставляя результаты физического эксперимента с вычислительными экспериментами, и меняя условия вычислительных экспериментов, можно установить факторы, результатом действия которых являются искажение формы волокна в поперечном сечении, нарушение концентричности сердцевины, переменный по длине диаметр волокна и т. д. Вычислительный эксперимент дает возможность детально выявить роль каждого фактора, так или иначе влияющего на качество волокна: локальные и глобальные возмущения полей температур и скоростей расплава и окружающего расплав газа, нарушение механической осевой симметрии фильер

оболочки и сердцевин и оболочки, флуктуации подаваемых на вход фильер давлений и т. д.

Третье направление вычислительного эксперимента - виртуальная обработка перспективных устройств для получения двухслойных волокон. Вычислительный эксперимент позволяет на предпроектной стадии создания устройства оптимизировать его конструкцию, исходя из максимального качества получаемых на нем волокон, с учетом реальной точности выдерживания системами устройства заданных условий вытяжки, устойчивости процесса вытяжки по отношению к внешним возмущениям, а также физических характеристик, в первую очередь, вязкости, теплопроводности, теплоемкости тех расплавов, из которых на данном устройстве будут вытягиваться волокна.

**Во второй главе** приводятся теоретические основы численного решения уравнений вязкой жидкости в современных пакетах. Для исследования течения струи расплава стекла применяется прямой метод математического моделирования, позволяющий описать ламинарный режим течения сред с границами раздела в неоднородном температурном поле, при теплопередаче осуществляемой посредством конвекции и теплопроводности. Исследуемое течение описывается следующей системой уравнений

$$\begin{aligned} \rho_i \left( \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial t} + V_{ix} \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial x} + V_{iy} \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial y} + V_{iz} \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial z} \right) = -grad p - \rho g \vec{j} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \eta'_i \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial x} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta'_i \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \eta'_i \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (\eta'_i grad V_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\eta'_i grad V_y) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} (\eta'_i grad V_z), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + div(\rho_i \vec{V}_i) = 0, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial(\rho_i c_{pi} T)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_i c_{pi} V_{ix} T) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_i c_{pi} V_{iy} T) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_i c_{pi} V_{iz} T) \right) = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_i \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_i \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_i \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Phi_i. \end{aligned} \quad (3)$$

В уравнениях количества движения (1), неразрывности (2) и энергии (3) индекс  $i = 1$  соответствует расплаву сердцевин,  $i = 2$  – расплаву оболочки;  $\vec{V}_i$  – скорость соответствующего расплава,  $g$  – ускорение силы тяжести (ось  $Oy$  направлена вверх),  $\rho_i$  – плотность,  $p$  – давление,  $T$  – температура,  $\eta'_i$  – динами-

ческая вязкость,  $c_{pi}$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $k_i$  – теплопроводность,  $\Phi_i$  – скорость диссипации механической энергии в единице объема расплава в тепло (функция рассеивания),

$$\begin{aligned} \Phi_i = & 2\eta'_{ii} \left( \left( \frac{\partial V_{ix}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_{iy}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_{iz}}{\partial z} \right)^2 \right) + \\ & + \eta'_{ii} \left( \frac{\partial V_{ix}}{\partial y} + \frac{\partial V_{iy}}{\partial x} \right)^2 + \eta'_{ii} \left( \frac{\partial V_{iz}}{\partial x} + \frac{\partial V_{ix}}{\partial z} \right)^2 + \eta'_{ii} \left( \frac{\partial V_{iz}}{\partial y} + \frac{\partial V_{iy}}{\partial z} \right)^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Вязкость расплавов стекол является в общем случае нелинейной функцией скоростей деформации следующего вида:

$$\eta'_{ii} = A_i H_i^{n-1}, \quad (5)$$

где  $H_i$  – инвариант тензора скоростей деформации,

$$\begin{aligned} H_i = & \left( 2 \left( \left( \frac{\partial V_{ix}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_{iy}}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_{iz}}{\partial z} \right)^2 \right) + \left( \frac{\partial V_{ix}}{\partial y} + \frac{\partial V_{iy}}{\partial x} \right)^2 + \right. \\ & \left. + \left( \frac{\partial V_{ix}}{\partial z} + \frac{\partial V_{iz}}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial V_{iy}}{\partial z} + \frac{\partial V_{iz}}{\partial y} \right)^2 \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Система уравнений (1)-(3) должна дополняться начальными и граничными условиями, соответствующими исследуемой модели. Реализация разработанных схем решения осуществляется с использованием современного пакета вычислительной гидрогазодинамики Ansys CFX, на многопроцессорных серверах и вычислительном кластере.

Решение задач с использованием вычислительного эксперимента по разработанным схемам включает в себя следующие этапы:

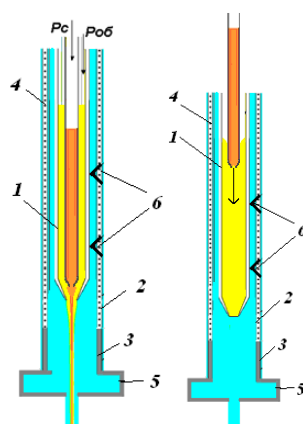
1. физическая постановка задачи;
2. построение геометрической и сеточной модели;
3. решение уравнений движения жидкости с использованием рекомендованных численных методов;
4. анализ результатов решения.

В главе представлена подробная физическая постановка задачи вытяжки двухслойного волокна на установке, применяемой в ИХВВ РАН (патент на изобретение № 2401815 «Двойной тигель и способ изготовления волоконных све-



товодов из стекол, склонных к кристаллизации и содержащих макрокомпонент с повышенной летучестью»). Контейнер с твердой литой цилиндрической заготовкой материала оболочки помещается в печь, где подогревается до превращения твердой заготовки в расплав. Одновременно осуществляется плавление сердцевины. После расплавления материалов, в контейнер оболочки вертикально погружается контейнер с материалом сердцевины (рисунок 1 а). Процесс погружения прекращается, когда выходное сечение контейнера сердцевины оказывается в конической части контейнера оболочки, несколько выше его выхода.

После процесса погружения, фильера двойного тигля 1, состоящая из контейнеров сердцевины и оболочки, некоторое время выдерживается в печи в некотором заданном температурном режиме. Камера состоит из печи 2, цилиндрической части без встроенных нагревателей 3, нагревателей 4 и диафрагмы 5. (рисунок 1 б). Печь нагрева состоит из двух вертикальных секций, температура в каждой из которых регулируется контролирующими термодарами 6. Две эти термопары установлены в печи в газовой среде между нагревательными элементами и контейнером с расплавом оболочки. В печи поддерживается заданная температура. Режим работы печи поддерживается автоматически. После выстаивания фильеры двойного тигля в печи на вход контейнеров подаются избыточные давления  $\Delta p_{сер}$  и  $\Delta p_{обол}$ , величины которых поддерживаются стабилизирующими устройствами. Расплавы сердцевины и оболочки вытекают из области печи, входят в область диафрагмы и далее в атмосферу, охлаждаются и затвердевают, постепенно превращаясь в гибкое двухслойное волокно. Диафрагма устанавливается для ограничения конвективных потоков прилегающего к расплаву воздуха. Волокно подхватывается и направляется на барабан, вращающийся с фиксированной угловой скоростью. Величина этой скорости поддерживается специальным устройством. Далее собственно, происходит процесс вытяжки, цель которого получить геометрически и физически однородное двухслойное волокно, поперечное сечение которого есть круг, состоящий из материала сердцевины круговой формы и концентричного с этим малым кругом кольца из материала оболочки.



а) б)  
Рисунок 1 – Печь нагрева

В связи с проблемами, возникающими при реализации изложенного процесса вытяжки из расплавов теллуридных стекол на практике, в работе разработаны и представлены следующие методики.

1. Методики численного эксперимента по исследованию влияния геометрических дефектов, геометрической и тепловой асимметрии на геометрию вытянутого волокна.

2. Методика моделирования движения и тепловых полей расплава и газа в экспериментальной установке вытяжки волокон с учетом автоматического управления нагревателями и теплопередачи через стенку фильеры. Практическая ценность этого исследования обусловлена необходимостью поддержания в расплаве однородного и стационарного поля температур. Нестационарность поля температур ведет к колебаниям диаметра вытянутого волокна.

3. Методика моделирования процесса погружения фильеры с расплавом сердцевины в оболочечный расплав.

Следующей частью диссертационной работы является развитие расчетно-экспериментальных методик определения физических свойств расплава стекла в широком температурном диапазоне, а именно методики определения вязкости и методики определения удельных теплоемкости и теплопроводности.

1. Расчетно-экспериментальная методика определения вязкости расплава стекла.

Фотография созданной экспериментальной установки представлена на рисунке 2 а), ее схема на рисунке 2 б).

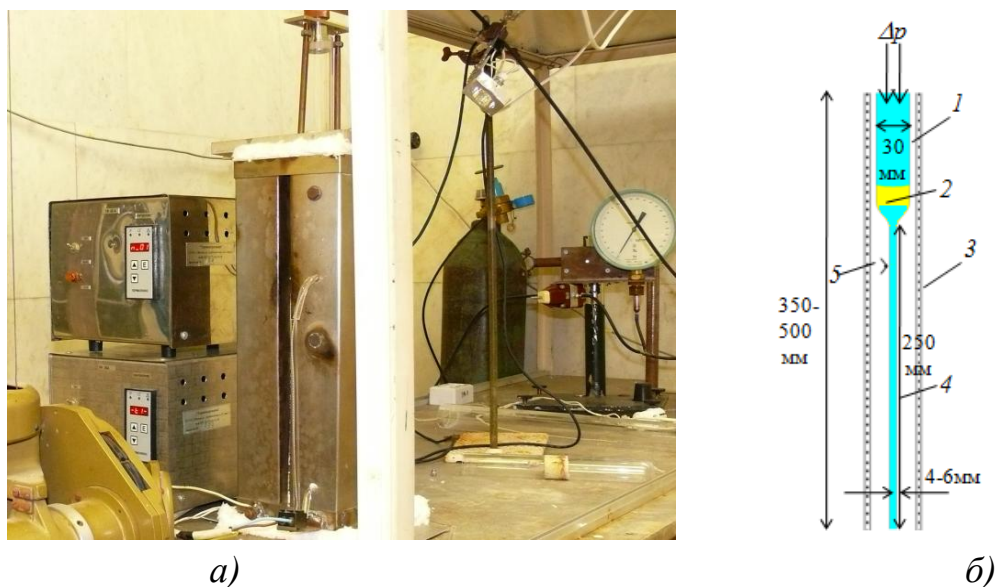


Рисунок 2 - а) Экспериментальная установка для определения вязкости расплава; б) Схема установки

В кварцевый тигель  $1$ , один из концов которого сужается в трубку, помещается предварительно взвешенный цилиндрический образец стекла  $2$ , после чего тигель фиксируется в печи  $3$  в вертикальном положении. Печь нагревается до температуры  $T_n$ . После размягчения образца тигель выдерживается в печи до выравнивания в расплаве температурного поля. Далее на вход тигля через отверстие в уплотнительной головке подается избыточное давление  $\Delta p$  инертного газа (аргон ОСЧ). Под действием приложенного давления расплав проходит вниз по узкой трубке  $4$ . Положение уровня нижнего края расплава измеряется катетометром КМ–8 через фиксированные промежутки времени ( $\sim 10-30$  с). После прохождения расплавом некоего характерного расстояния (приблизительно 30-50 мм) входное давление повышается.

В ходе одного эксперимента изложенная процедура повторяется для нескольких значений избыточного давления  $\Delta p$ , что способствует повышению точности определения вязкости при температуре  $T^*$ , где  $T^*$  - фактическая температура расплава.

По результатам измерения положения нижнего края расплава, строится зависимость расстояния  $\Delta l$ , пройденного нижней точкой расплава вдоль вертикальной оси трубки, от времени  $t$ . Полученная зависимость  $\Delta l(t)$  является главным параметром, по которому в дальнейшем определяется вязкость расплава.

Для установления соответствия между температурой печи  $T_n$  и фактической температурой расплава  $T^*$  была проведена серия вспомогательных экспериментов. Установлено, что температурное поле в трубке  $4$  можно считать изо-

термальным с точностью до 1.5 К на участке ~ 10-80 мм от сужения тигля. Данная зона является рабочей для определения вязкости расплава.

На следующем этапе проводится математический эксперимент, условия которого в точности повторяют условия физического эксперимента. Полученная в ходе решения задачи зависимость перемещения расплава от времени  $\Delta l_{\text{mat}}(t)$  сравнивается с соответствующей экспериментальной зависимостью  $\Delta l(t)$ . Если различие между указанными зависимостями составляет менее 3%, то вязкость расплава при температуре  $T^*$  полагается равной заданной в математической модели, в противном случае величина вязкости в модели корректируется и задача решается повторно. Эта процедура проводится до тех пор, пока результат вычислительного эксперимента не совпадет с результатом, зарегистрированным в физическом эксперименте.

2. Расчетно-экспериментальная методика определения теплопроводности и удельной теплоемкости расплава стекла.

Основными узлами экспериментальной установки служили две вертикальные трубчатые печи сопротивления, расположенные соосно, одна под другой, с частично перекрывающимися зонами нагрева (рисунок 3 а).

Внутри нижней печи находится медный цилиндр, используемый в качестве теплопередающей среды. Размеры его (диаметр 20 мм, высота около 200мм) были подобраны таким образом, чтобы заполнить всё внутреннее рабочее пространство печи. Медный цилиндр вместе с изготовленным из асбоцемента верхним фланцем этой печи играл также роль подставки для плоскодонной пробирки из кварцевого стекла, в которую помещался образец исследуемого вещества. Пробирка накрывалась кварцевым колпаком, сужающимся в верхней части в трубку диаметром 6 мм, которая предназначалась для ввода внутрь верхней печи контрольной термопары. Диаметр колпака составлял около 30 мм, внешний диаметр пробирки – 20 мм (при толщине её стенки 1,5 мм). С наружной стороны колпака, коаксиально по отношению к нему, дополнительно устанавливалась кварцевая трубка высотой 140 мм и внешним диаметром 40 мм, выполнявшая функцию экрана. По диаметру верхнего основания медного цилиндра была сделана прорезь в виде жёлоба глубиной не более 1,5 мм и шириной 2 мм, в которую вставлялась контрольная термопара хромель-алюмель, позволявшая измерять температуру в месте соприкосновения дна кварцевой пробирки с нагревающимся нижней печью цилиндром.

Верхняя печь предназначена для расплавления исследуемого образца и первоначального прогрева полученного расплава. Характеристики её рабочего пространства: высота 278 мм и диаметр 50 мм. Нагрев регулировался термопа-

рой хромель-алюмель, которая располагалась в пространстве между внутренней трубой и обмоткой печи. Для снижения потерь тепла и увеличения зоны равномерного разогрева печь имеет дополнительную внешнюю теплоизоляцию. Верхнее отверстие печи заглушено пробкой из теплоизоляционного материала. Для измерения температуры внутри использовались две контрольные термопары:

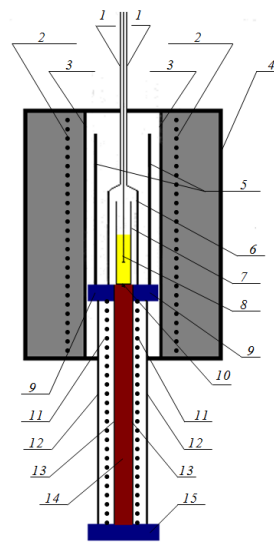
- платинородиевая термопара (ТПР), опускающаяся через отверстие в пробке и кварцевую трубку непосредственно в исследуемый расплав;

- термопара хромель-алюмель (ТХА), которая располагается с внешней стороны экрана (в ходе эксперимента глубину погружения этой термопары в печь меняли для уточнения параметров температурного поля внутри печи и выявления вертикального температурного градиента). На завершающем этапе эксперимента данная термопара вынимается из печи, и с ее помощью производится обмер температурного поля на внешних стенках теплоизоляционной заглушки и узкой трубки 1 рисунка 3 а).

Фото экспериментальной установки представлено на рисунке 3 б).



а)



б)

Рисунок 3 – а) Экспериментальная установка для определения теплопроводности и удельной теплоемкости расплава;

б) Схема экспериментальной установки (вертикальный разрез).

*Верхняя печь:* 1- узкая трубка для ввода термопары, 2 – нагревательная обмотка, 3 – внутренняя труба, 4 - кожух, 5 – кварцевый экран, 6 – колпак, 7 – пробирка, 8 – контрольная термопара. *Нижняя печь:* 9 – верхний фланец, 10 – контрольная термопара, 11 - нагревательная обмотка, 12 – внешняя труба, 13 – внутренняя труба, 14 – медный стержень, 15 – нижний фланец.

Всего в эксперименте было использовано 5 термопар – 2 регулирующие (для верхней и нижней печей, соответственно) и 3 контрольные. Их показания фиксировались независимо друг от друга регуляторами температуры, а затем

передавались для компьютерной записи. Передача данных осуществлялась посредством интерфейса RS–232, через подсоединение регулятора температуры к последовательному порту компьютера. Цикл опроса при регистрации значений температуры составлял 1 с.

Эксперимент проводится в 2 этапа. Сначала на обеих печах устанавливается одинаковая температура ( $T_1$ ), необходимая для плавления компактного образца, помещённого в пробирку, и стабилизации теплового режима в установке в целом. После выхода показаний контрольных термопар на постоянное значение, осуществляется второй этап нагрева: температура нижней печи повышается ещё на 50–60 К ( $T_2$ ), в то время как верхняя печь продолжает поддерживать температуру  $T_1$ . Медный цилиндр, нагретый до температуры  $T_2$ , передает часть избыточного тепла контактирующей с ним кварцевой пробирке и находящемуся в ней расплаву. Тепловой поток через расплав приводит к возрастанию его температуры, определяемому по показаниям контрольных термопар. В этом случае характерными величинами являются

- показания термопары ТПР внутри расплава;
- время достижения теплового равновесия, отсчитываемое с момента повышения температуры нижней печи.

Эти параметры использовались для идентификации теплоемкости и теплопроводности в вычислительных экспериментах.

Далее, как и в методике определения вязкости расплава, для данного физического эксперимента строится математическая модель. Вычислительный эксперимент проводится для конкретных значений теплопроводности и удельной теплоемкости расплава. Если в результате моделирования разница температур в точках расчетной области, соответствующих положениям термопар в физическом эксперименте и характерное время разогрева совпадают с экспериментальными, то теплоемкость расплава считается определенной. В противном случае искомые величины корректируются и вычислительные эксперименты проводятся до тех пор, пока результаты по средней температуре и разнице температур не совпадут с результатами физического эксперимента.

В **третьей главе** приведены результаты математического моделирования течения расплавов и окружающего их газа при вытяжке волокон методом двойного тигля. Исследование течения проведено с использованием моделей как ньютоновской, так и вязкопластической жидкостей. Проведено моделирование процесса с учетом температурных флуктуаций и наличием геометрических дефектов в установке вытяжки волокон. Полученные в этой части результаты позволяют выдвинуть требования по точности поддержания температурных ре-

жимов и выбору форм фильер при практической реализации процесса вытяжки. Полное моделирование термогидродинамических процессов в термокамере, моделирование процесса погружения фильеры сердцевины, формирования и последующего течения струи, позволило выявить ряд негативных факторов, принципиально влияющих на качество получаемого волокна, а так же разработать ряд мер по нивелированию указанных факторов.

В результате применения разработанных расчетно-экспериментальных методик по определению физических свойств расплавов получены данные по вязкостным и тепловым свойствам расплавов в рабочем диапазоне температур, позволяющие улучшить технологию вытяжки волокон.

Исследования, проводимые сочетанием методов математического и физического экспериментов, позволили сформировать и обосновать методологию нового способа получения двухслойных струй для вытяжки одномодовых волокон, адаптированную к свойствам расплавов стекол, склонных к кристаллизации и содержащих летучий макрокомпонент.

*1. Моделирование течения расплавов в фильере двойного тигля.* В начальный момент времени расплавы находятся в своих контейнерах. Далее, на входы сердцевины и оболочки подаются избыточные давления, расплав сердцевины выходит из своего конического канала и взаимодействует с движущимся расплавом оболочки (рисунок 4).

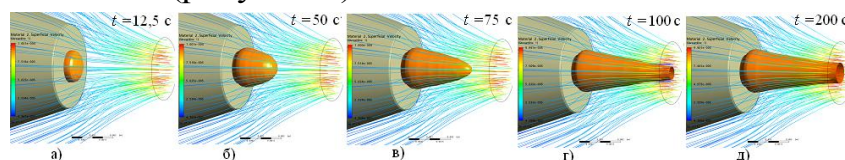


Рисунок 4. Компьютерные кадры границы раздела расплавов и траектории жидких частиц

Математическое моделирование движения струи проводилось для случаев ньютоновского и вязкопластического течения. Выявлено, что фактор вязкопластичности ведет к более резкому расширению струи. Экспериментально установлено, что наличие развитой "луковицы" повышает устойчивость течения при вытяжке волокон. Таким образом, при вытяжке волокон из расплавов теллуридных стекол, следует обеспечить более протяженный участок поверхности раздела сред, на котором кривизна этой поверхности в радиальном направлении отрицательна. По-видимому, это можно обеспечить изменением радиусов в конической части контейнеров и уменьшением толщины стенки на выходе из конической части контейнера сердцевины.

Течение моделировалось при различной степени охлаждения струи. Установлено, что охлаждение струи может быть рекомендовано для стабилизации диаметра получаемых волокон.

*2. Исследование локальных температурных неоднородностей в фильере двойного тигля.* По результатам математического моделирования течений при локальных температурных возмущениях можно сделать следующие заключения.

Форма струи расплава сердцевины на выходе из тигля не чувствительна к температурным возмущениям, действующим как в верхней части конических так и цилиндрических каналах контейнеров сердцевины и оболочки. Этот результат вполне объясняется высокими диффузионными свойствами расплавов, как кинематическими, так и тепловыми.

Форма струи расплава сердцевины на выходе из тигля крайне чувствительна к локальным температурным возмущениям, действующим в нижней части конического канала сердцевины. Поле температур на выходе из тигля при этом однородно, поле осевых скоростей обладает осевой симметрией. Однако струя сердцевины смещена относительно оси симметрии. Отклонение оси струи происходит в поперечном направлении в ту сторону, где температура вверх по фильере была меньше. В поперечном сечении струя расплава сердцевины теряет форму круга.

Результаты математического моделирования можно использовать для физической диагностики факторов, приводящих к снижению качества получаемых вытяжкой двухслойных волокон. Чувствительность геометрии вытягиваемого волокна к локальным температурным возмущениям в нижней части фильеры позволяет, в принципе, использовать это свойство для управления формой поперечного сечения вытягиваемого волокна.

*3. Результаты исследования геометрических дефектов фильеры двойного тигля на форму поперечного сечения волокна.*

В работе изучались пять видов геометрических дефектов (наклон контейнера сердцевины, скос на выходном сечении контейнера сердцевины, выпуклость и борозда на стенке контейнера сердцевины, выпуклость на стенке контейнера оболочки), наиболее часто возникающих на практике. Результаты численных экспериментов показывают, что из всех рассмотренных дефектов только наклон контейнера сердцевины и выпуклость на контейнере оболочки приводят к отклонению формы струи-волокна от концентрических окружностей.



Возмущения, вызванные остальными тремя дефектами, ввиду высоких вязкостных свойств расплавов быстро диффундируют.

На рисунке 5 представлена геометрия фильеры с наклоненным контейнером сердцевины и форма получаемого поперечного сечения струи. Тигель с расплавом сердцевины установлен во внешний тигель не симметрично. При этом область формирования луковицы не совпадает с областью осевой симметрии. Поле осевых скоростей расплава сердцевины не обладает осевой симметрией. Не смотря на то, что струя расплава стремится «вернуться» в область осевой симметрии, отклонение от оси полностью не устраняется в процессе вытяжки, как показывают результаты моделирования. Вместе с тем, в виду отсутствия осевой геометрической симметрии возникает неоднородность поля температур на выходе из тигля. Действительно, контейнер с расплавом сердцевины установлен не строго вертикально как по отношению к контейнеру оболочки, так и по отношению к стенкам нагревающей печи. Соответственно часть контейнера сердцевины, расположенная ближе к стенке печи нагревается более интенсивно. Различия в нагреве составляют несколько градусов, и как показано в предыдущем пункте подобные температурные неоднородности в области выхода из тигля искажают форму поперечного сечения волокна.

На рисунке 6 представлена геометрия фильеры и форма поперечного сечения вытягиваемого волокна в случае наличия выпуклости на контейнере оболочки..

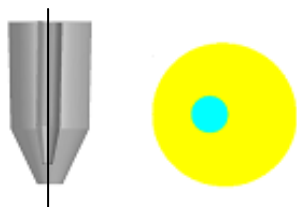


Рисунок 5 – Геометрия фильеры при наклоне контейнера сердцевины и поперечное сечение вытягиваемого волокна



Рисунок 6 - Геометрия фильеры при наличии выпуклости на контейнере оболочки и поперечное сечение вытягиваемого волокна

Продольная форма вытягиваемого волокна и линии тока окружающего газа продемонстрированы в свою очередь на рисунке 7. Результаты моделирования показывает, что через выпуклость (пространство, образовавшееся в поперечном сечении при отклонении формы внешней фильеры от круговой) в контейнер оболочки поступает воздух. Этот воздух заполняет часть области, в которой должен находиться расплав. Расплавы оболочки и сердцевины сдавливаются поступившим воздухом, вследствие чего они и приобретают дефектную форму. Отметим, что при рассмотрении аналогичных дефектов на контейнере сердце-

вины подобная ситуация не наблюдается. Это объясняется тем, что внутренний контейнер погружен в контейнер с расплавом оболочки и не контактирует с окружающей средой, следовательно воздух в него не проникает.

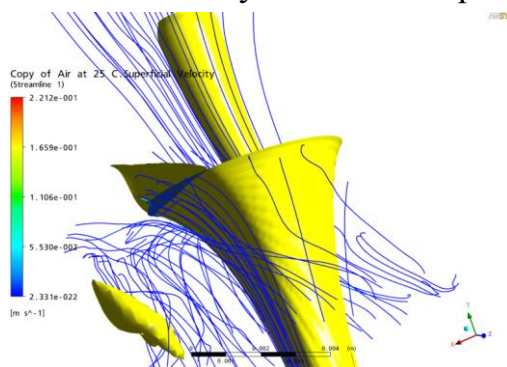


Рисунок 7 – Форма струи и линии тока в случае выпуклости на фильере оболочки

4. *Моделирование узла нагрева фильеры тигля для вытяжки теллуритных световодов.* В ходе проведенных работ установлен ряд факторов, которые принципиально не могли быть обнаружены в физическом эксперименте.

В районе выхода расплава из фильеры имеются 2 встречных потока газа. Наличие встречных конвективных потоков негативно сказывается на структуре течения.

В районе диафрагмы в окружающем расплав газе образуются вихри. Причина образования связана с температурными градиентами и геометрическими особенностями установки.

Вихреобразование и встречные конвективные потоки снижают устойчивость течения расплавов и газа.

Температура, показываемая термопарами, установленными в печи вблизи тигля, не совпадает с температурой расплава в тигле. В рассмотренных вариантах расчетов это расхождение достигало 25 К. Причиной этого расхождения является циркуляционное движение перегретого газа с внешней части пространства, прилегающего к печи во внутрь печи.

Температурное поле в тигле неоднородно по вертикали, верхние слои расплава нагреты больше, чем нижние. В связи с сильно выраженной зависимостью вязкостных свойств теллуритных расплавов от температуры, температурная неоднородность может привести к существенным различиям характеристик расплава в разных областях тигля друг от друга.

Моделирование показывает, что эти факторы могут вести к эллиптичности волокна, нарушению его концентричности. Кроме того, вследствие зависимости скорости кристаллизации от температуры, физико-химические свойства волокна могут оказаться неоднородными по его длине.

Проведено математическое моделирование различных модернизированных вариантов установки. По результатам вычислительных экспериментов выявлен перспективный вариант модификации конструкции установки, в котором возможно ликвидировать вихреобразования, резко повысить однородность температурного поля в тигле, а так же реализовать охлаждение вытягиваемого волокна.

5. *Моделирования погружения фильеры расплава сердцевины в оболочечный расплав.* Разработана методика численного эксперимента процесса погружения фильеры сердцевины в оболочечный расплав с использованием принципа обращения движения.

Вычислительные эксперименты свидетельствуют, что после полного погружения фильеры сердцевины в пристеночной области остается прослойка воздуха. В выходную область контейнера сердцевины также попадает воздух и расплав оболочки, что обусловлено градиентами давлений в этой области, а так же соотношением вязкостей расплавов. Для минимизации пристеночной воздушной прослойки коническую часть фильеры сердцевины целесообразно заострять. Установлено так же, что с увеличением степени прогрева расплава оболочки относительно расплава сердцевины, объем расплава оболочки, попадающий в контейнер сердцевины, падает. В ходе исследования были проведены вычислительные эксперименты с различными скоростями погружения фильеры сердцевины. При увеличении скорости погружения, возрастают и градиенты давлений в контейнере сердцевины, при этом оболочечный расплав глубже проникает в фильеру сердцевины, таким образом, скорость погружения должна быть минимальна.

6. *Определение вязкости расплава стекла.* До определения вязкости расплавов теллуридных стекол изложенная методика прошла валидацию на расплавах сульфидно-мышьякового стекла состава  $As_{37,7}S_{62,3}$ .

На рисунке 8 приведена определенная по разработанной расчетно-экспериментальной методике температурная зависимость вязкости стекла  $(TeO_2)_{0,70}(WO_3)_{0,22}(La_2O_3)_{0,08}$  в функциональном виде  $\ln \eta_1 (1/T)$ . В интервале 783-833 К она соответствует зависимости аррениусовского типа:

$$\ln \eta_1 [\text{Па} \cdot \text{с}] = -69.39 + 61\,650/T[\text{K}].$$

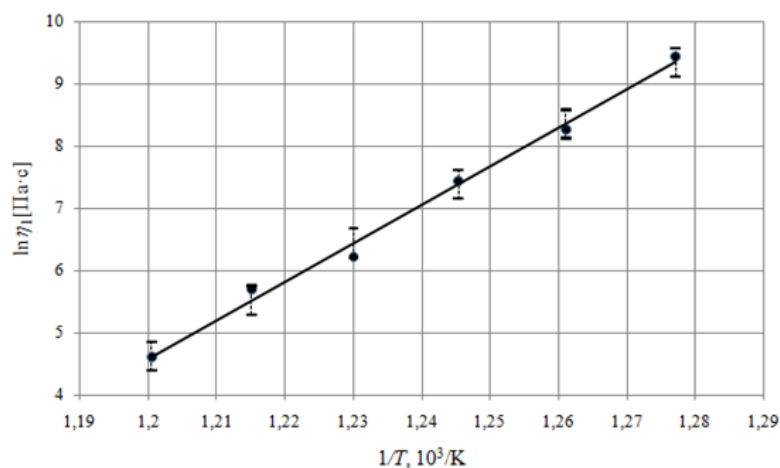


Рисунок 8. Температурная зависимость вязкости стекла состава  $(TeO_2)_{0,70}(WO_3)_{0,22}(La_2O_3)_{0,08}$  для диапазона температур 783 – 833 К

7. *Определения теплопроводности и удельной теплоемкости расплава стекла.* Валидация методики производилась расплаве олова и расплаве халькогенидного стекла  $As_{37,7}S_{62}$ .

Значением теплопроводности с точностью 10% расплава стекла состава  $(TeO_2)_{0,70}(WO_3)_{0,22}(La_2O_3)_{0,08}$  в температурном диапазоне 808 - 838 К является  $k_f=1.1$  Вт/м·К. Удельная теплоемкость расплава стекла состава  $(TeO_2)_{0,70}(WO_3)_{0,22}(La_2O_3)_{0,08}$   $c_{pI}=150$  Дж/кг·К с точностью 15%.

8. *Отработка методами вычислительного эксперимента перспективных устройств для вытяжки одномодовых волокон из расплавов стекол, склонных к кристаллизации и содержащий летучий макрокомпонент.*

Идея проектирования нового устройства для вытяжки оптических волокон методами вычислительного эксперимента состоит в следующем. К искомой схеме выставляются ряд критериев, выполнение которых должно обеспечить изготовление качественного одномодового волокна из расплавов теллуридных стекол. Учитывая накопленный опыт в исследовании процесса вытяжки, сформулированы следующие критерии:

1. Двухслойная струя должна иметь форму концентрических окружностей, при этом радиус сердцевины должен быть на порядок меньше радиуса оболочки.

2. В области течения струи объемные фракции воздуха не должны превышать величину 0,01%.

3. Радиусы струи расплава сердцевины и всей двухслойной струи не должны меняться с течением времени.

По разработанной методике моделирования просчитывается ряд вариантов с внесенными в виртуальное устройство геометрическими изменениями, а

так же изменениями физических факторов протекания процесса. По результатам вычислительного эксперимента принимается решение о модификации элементов схемы. Данная процедура проводится до тех пор, пока параметры получаемой двухслойной струи не будут удовлетворять выставленным критериям.

В диссертационной работе рассмотрена отработка методами вычислительного эксперимента двух новых устройств для получения одномодовых волокон.

Идея, на которой построено функционирование первого устройства, возникла при анализе «неудачных» результатов физических экспериментов, в которых вместо требуемого двухслойного волокна было получено трехслойное волокно. Схема первого устройства базируется на идее формирования двухслойной струи методом «погружение-выдавливание». В контейнер 1 (рисунок 9) помещается цилиндрическая заготовка расплава оболочки, 2, и затем на нее кладется тонкий слой сердцевинного материала 3. Контейнер помещается в печь 4 и выдерживается в ней до превращения материалов в расплав. Далее в него вертикально погружается полое тело конической формы 5. Верхний расплав при погружении обволакивает тело (эффект вытеснения) и частично прилипает к нему. Далее полое тело подогревается и на вход контейнера 1 подается избыточное давление. Расплавы текут вниз в пространство, при этом в области оси симметрии концентрируется тонкая струя сердцевины, образованная расплавом, стекающим со стенок погруженного тела, эта струя обжимается расплавом оболочки, таким образом, на выходе образуется двухслойное волокно.

Методами математического моделирования были установлены основные факторы, оказывающие влияние на процесс получения двухслойного волокна, и пути повышения стабильности течения двухслойной струи, а именно: обеспечение значительного радиального градиента температур в контейнере и близких вязкостных характеристик расплавов сердцевины и оболочки, увеличение угла раствора конической части запаянной фильеры.

Изложенная идея формирования двухслойной струи нашла свое подтверждение в физических экспериментах. На цилиндрическую заготовку оболочки была положена цилиндрическая заготовка сердцевины малой высоты. После превращения материалов оболочки и сердцевины в расплав с помощью выдавливающего расплавы давления была осуществлена вытяжка двухслойного волокна. Фотографии поперечных сечений световода, полученного по предлагаемой схеме, представлены на рисунке 10. Здесь  $l$  – расстояние по длине волокна от его начала до представленного поперечного сечения.

Метод «погружение-выдавливание» относительно прост в реализации, обладает широкими возможностями по регулированию течения двухслойной струи. Однако к настоящему времени в рамках только этой схемы не удается реализовать длительного стабильного режима течения двухслойной струи, позволяющего получать световоды с потребной для практики длиной  $l > 100$  м.

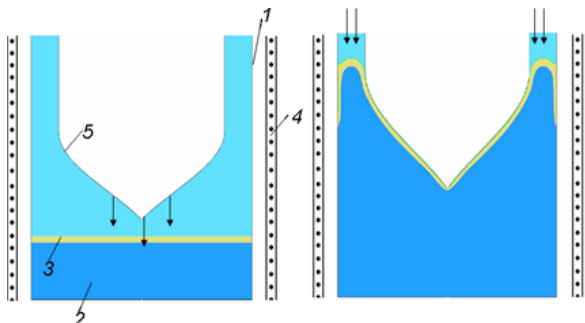


Рисунок 9 - Схема устройства, основанного на методе «погружение-выдавливание»

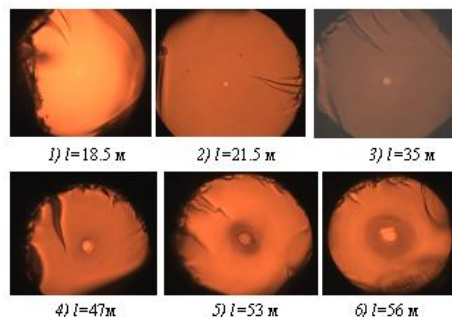


Рисунок 10 - Фотографии торцов световода в различных поперечных сечениях волокна

Идея второго устройства базируется на эффектах течения при создании воздушной подушки, когда фиксированным давлением в камере в «отходы» предварительно оттесняются фрагменты расплавленных заготовок, содержащие фракции воздуха и другие инородные поверхностные примеси.

Принципиальная схема устройства по вытяжке волокон представлена на рисунке 11. В печь 1, имеющую конфигурацию, представленную на рисунке, помещается заготовка оболочечного материала 2. Далее в трубку 3 помещается материал сердцевины 4. Для обеспечения однородного поля температур конструкция печи выполнена из теплопроводного металла (медь, никель, латунь). В печи поддерживается заданный температурный режим, при этом температура в устройстве контролируется термопарами 5,6,7. После нагрева печей до заданной температуры и плавления расплавов, на входы 8 и 9 подаются избыточные давления  $\Delta p_1$  и  $\Delta p_2$ .

Под действием избыточного давления воздух вытесняется в область 10 с открытой границей 11; при этом используются гидродинамические эффекты подпора, сопутствующего формированию воздушной подушки. После вытеснения воздуха через некоторое время выход 11 перекрывается и в нижней части конструкции формируется двухслойная струя. Струя течет вниз в пространство, где подхватывается и вытягивается в волокно.

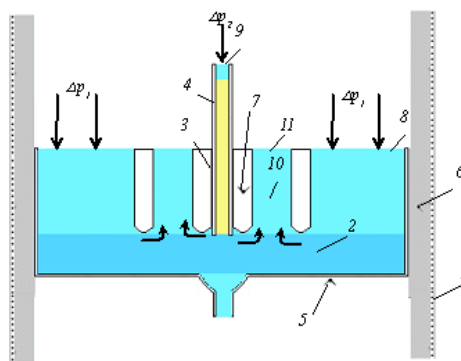


Рисунок 11 - Принципиальная схема перспективного устройства по вытяжке волокон (обозначения в тексте)

В серии виртуальных экспериментов в конструкцию был внесен ряд изменений. На рисунке 12 представлена окончательная версия предлагаемой схемы. Вычислительные эксперименты показывают, что при использовании заготовок теллуричного стекла диаметром 50 мм на предлагаемом устройстве возможно получение качественного одномодового волокна из расплавов теллуричных стекол. При этом изменение диаметра сердцевины в волокне прогнозируется не превышающем 0,1% , а содержание в волокне объемных долей воздуха – 0,0001 %.

Работоспособность предлагаемой модели проверена на экспериментальной установке, близкой по конструкции и идеологии к разработанной. В результате были получены световоды с геометрией, требуемой для изготовления одномодовых волокон.

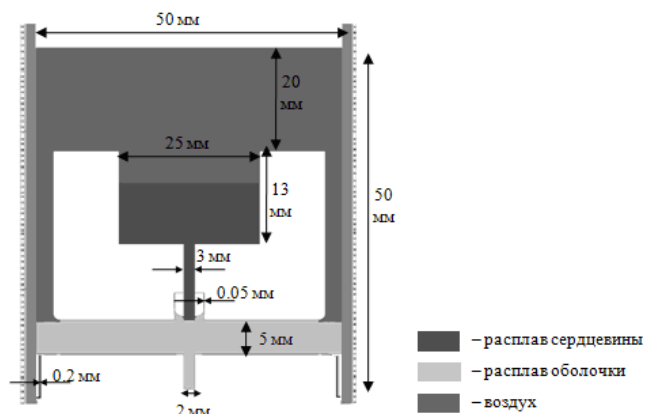


Рисунок 12 – Окончательная версия предлагаемой схемы

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты диссертационного исследования состоят в следующем:

1. Разработана методика моделирования течения расплавов и воздуха в фильере двойного тигля с учетом границ раздела сред и сжимаемости воздуха в неоднородном температурном поле. Теплопередача в математической модели

реализуется посредством конвекции и теплопроводности, режим течения – ламинарный. Исследование течения проведено как на моделях ньютоновской так и вязкопластической жидкостей. Температура струи расплава принципиально влияет на характеристики устойчивости течения расплава при вытягивании волокна из фильеры. В исследованных диапазонах температур охлаждение струи может быть рекомендовано для стабилизации диаметра получаемых в технологических процедурах вытяжки волокон.

2. Проведен ряд вычислительных экспериментов по течению расплавов в фильере двойного тигля с учетом локальных температурных неоднородностей, выявлена зона, температурные возмущения в которой ведут к искажению формы двухслойной струи, и, как следствие, к снижению качества вытягиваемого волокна. Установлена возможность управления формой поперечного сечения струи путем задания неоднородного температурного поля в указанной зоне.

3. Выполнены исследования по влиянию геометрических дефектов двойного тигля на форму получаемой двухслойной струи. Обнаружено два дефекта, наличие которых недопустимо в тиглях при осуществлении процедуры вытяжки: наклон контейнера сердцевины относительно оси симметрии и выпуклость на контейнере оболочки.

4. Осуществлено моделирование узла нагрева фильеры тигля для вытяжки теллуридных световодов. По данному направлению работ выявлена неоднородность теплового поля в расплаве и в газовой среде вокруг фильеры при используемой конструкции фильеры тигля и печи нагрева тигля. В течении прилегающего к расплаву газа имеет место вихреобразование, ведущее к нестационарности процесса вытяжки волокон из тигля. Установлены пути снижения интенсивности протекания обнаруженных процессов.

5. Методами численного моделирования исследован процесс погружения фильеры сердцевины в оболочечный расплав с использованием принципа обращения движения. Выявлено, что вблизи фильеры сердцевины существует воздушная прослойка, оболочечный расплав и воздух попадают в фильеру сердцевины через ее выходную границу. Определены пути изменения местной геометрии фильеры сердцевины, реализация которых позволит уменьшить объем воздушной прослойки. Установлено, что для минимизации попадания расплава оболочки в контейнер сердцевины, оболочечный расплав должен быть прогрет значительно сильнее, чем расплав сердцевины, скорость погружения фильеры должна быть по возможности минимальной.

6. Разработана и верифицирована расчетно-экспериментальная методика определения вязкости расплавов. Получена зависимость вязкости от темпера-



туры для стекол состава  $(\text{TeO}_2)_{0,70}(\text{WO}_3)_{0,22}(\text{La}_2\text{O}_3)_{0,08}$  в рабочем диапазоне температур.

7. Разработана и верифицирована расчетно-экспериментальная методика определения теплоемкости и теплопроводности расплавов. По разработанной методике определены величины удельной теплопроводности и удельной теплоемкости в рабочем диапазоне температур для стекол состава  $((\text{TeO}_2)_{0,70}(\text{WO}_3)_{0,22}(\text{La}_2\text{O}_3)_{0,08})$ .

8. Методами вычислительного эксперимента обоснованы два новых устройства по получению оптических волокон из расплавов стекол, склонных к кристаллизации и содержащий летучий макрокомпонент. Обоснована перспективность одного них и показана способность получения с его помощью высококачественных одномодовых волокон с четкой границей сердцевины и оболочки.

### **Публикации по теме диссертации**

#### **Статьи, входящие в перечень изданий, утвержденных ВАК**

1. Л.В. Шабарова, Чурбанов М.Ф. Снопатин Г.Е.. Математическое моделирование течений расплавов стекол в неоднородных тепловых полях при вытягивании волокон. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2008г, 2, с. 107-114.
2. Л.В. Шабарова, Чурбанов М.Ф. Снопатин Г.Е.. О влиянии локальных температурных возмущений на геометрию волокна, вытягиваемого из фильеры двойного тигля. Проблемы прочности и пластичности, 2009г, № 71, с. 136-143.
3. Л.В. Шабарова. Развитие и применение методов вычислительного эксперимента для моделирования и совершенствования технологии оптических волокон. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2011г, №4 часть 3, с. 1259-1262.
4. Л. В. Шабарова, С. В. Сметанин, Г. Е. Снопатин, В. А. Шапошников. Расчетно-экспериментальная методика определения вязкости расплавов. Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, 2012, №5, с.147-151.

#### **Статьи в журналах, сборниках, труды и тезисы докладов научных конференций**

5. Lyubov Shabarova, Sergey Smetanin, Gennady Snopatin, Mikhail Churbanov, Vasiliy Shabarov. Viscosity of  $(\text{TeO}_2)_{0.7} - (\text{WO}_3)_{0.22} - (\text{La}_2\text{O}_3)_{0.08}$  Tellurite Glass Melt in 780 – 830 K Temperature Range. David Publishing Company/ Journal of Materials Science and Engineering A, 2013, 2(12), pp. 779-785.

6. Л.В. Шабарова. Течения расплавов стекол в неоднородных тепловых полях при вытягивании волокон. Материалы шестой молодежной научной школы-конференции Лобачевские чтения – 2007, Казань, с. 246-249.
7. Л.В. Шабарова. Исследование течений расплавов теллуритных стекол в тигле. Материалы седьмой молодежной научной школы-конференции Лобачевские чтения - 2008, Казань, с. 189-190.
8. Л.В. Шабарова. Определение тепловых полей при вытягивании волокон из расплавов теллуритных стекол. Тезисы к симпозиуму Новые высокочистые материалы, 2008г, Нижний Новгород, с. 192-194.
9. Л.В. Шабарова. О влиянии асимметричности теплового поля на геометрию волокна, вытягиваемого из фильеры двойного тигля. Материалы восьмой молодежной научной школы-конференции Лобачевские чтения – 2009г, Казань, с. 393-394.
10. Л.В. Шабарова. Развитие и применение методов вычислительного эксперимента для моделирования и совершенствования технологии получения оптических волокон. Необратимые процессы в природе и технике. Труды шестой всероссийской конференции, 2011 г., с. 67-71.
11. Г.Е. Снопатин, В.В. Шабаров, Л.В. Шабарова. Моделирование вытяжки волоконных световодов из расплавов стекол, склонных к кристаллизации и содержащих макрокомпонент с повышенной летучестью. Высокочистые вещества и материалы: получение, анализ, применение. Тезисы докладов 14 Всероссийской конференции. 2011 г., с. 197-198.
12. Л.В. Шабарова. Разработка новой технологии получения одномодовых оптических волокон с применением методов вычислительного эксперимента. Сборник материалов: "Пятая Всероссийская молодежная научно-инновационная школа "Математика и математическое моделирование" -Саров, 2011", с. 103-105.