

25.3 Вытяжка, область формирования и защита оптического волокна

Одной из основных стадий процесса изготовления оптического волокна является вытягивание его на установке вытяжки. Так, колебание диаметра по длине во многом определяют оптико-физические свойства ОВ (оптические потери при распространении сигнала, полосу пропускания и т.д.). Внутренние напряжения, формируемые в процессе вытяжки влияют на прочность и оптико-физические свойства. Количество поверхностных дефектов ОВ определяют механические свойства и деградацию с течением времени оптико-физических и механических свойств. Загрязнение исходных материалов также определяют оптико-физические и механические свойства, деградацию их с течением времени.

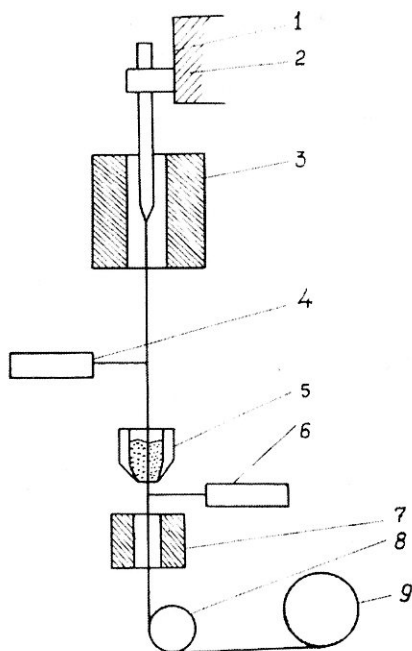


Рис. 25.3.1

На рис.25.3.1 представлена схема основных узлов вытяжного устройства для формирования волокна из заготовки. Заготовка вставляется в держатель механизма подачи 2, который медленно с постоянной скоростью опускает ее вниз в печь 3. Оптическое волокно формируется путем местного симметричного нагрева заготовки приблизительно до 2000°C (чуть выше точки размягчения стекла). Поскольку заготовка находится в зоне нагрева, то вытяжка производится из расплавленного материала, который образует струю со свободной поверхностью.

Форма струи определяется равновесием между силами внутреннего трения, поверхностного натяжения, тяжести, сопротивления трения о воздух, силой на придание ускорения стеклу и усилием сдвига. В качестве нагревательного устройства может использоваться: кислородно-водородная горелка, графитовый или циркониевый нагреватель, СВЧ-печь, CO_2 -лазеры. Основными требованиями к нагревательному устройству является симметричность нагрева и снижение до минимума концентрации пылевых час-

тиц в зоне нагрева, которые образуются из-за окисления деталей нагревателя при высоких температурах.

Частицы (как правило размером порядка 2 мкм), попавшие на поверхность расплавленной области заготовки или на поверхность волокна, могут вызвать появление микротрещин.

Волокно вытягивается и после нанесения полимерного покрытия в устройстве 5 и поляризации в печи 7, наматывается на барабан, который поддерживает натяжение в струе, заставляя ее по мере охлаждения утончаться. Конечный диаметр оптического волокна определяется диаметром заготовки, а также скоростями подачи заготовки в нагреватель и намотки на барабан. Непрерывно контролируя датчиком 4 диаметр волокна в процессе натягивания, температуру нагревателя, скорость подачи заготовки и вращения барабана, натягивается и наматывается на барабан волокна определенного постоянного диаметра. Вытяжка волокна из кварцевых заготовок обычно производится при скоростях намотки порядка 1–10 м/с. В этом случае с необходимой точностью воспроизводится в волокне отношение диаметров сердцевины внешнего диаметра.

25.4 Область формирования кварцевого оптического волокна

Определение области формирования ОВ можно проводить различными путями. Первый путь основывается на переходе жидкость–стекло (стеклование) и стекло–жидкость (размягчение). Каждой температуре соответствует определенная структура аморфного вещества, характеризуемые ближним порядком. При высоких температурах время реализации мало и перестройка структуры успевает за изменением температуры. При понижении температуры время реализации возрастает и при некоторой температуре T_a перестройка структуры начинает «опаздывать», а при более низкой T_1 структура фиксируется. Интервал температур $T_a - T_1$ называется областью стеклования. Для характеристики расположения интервала стеклования относительно шкалы температур используют понятие температуры стеклования T_g , которая определяется как температура, при которой физические свойства в этом интервале меняются наиболее резко. Наиболее распространенным методом определения температуры стеклования является метод теплового расширения. Величина T_g определяется пересечением прямолинейных участков кривой расширения выше и ниже области стеклования (рис. 25.4.1). Процесс обратный стеклованию, т.е. переход вещества из стеклообразного состояния в жидкое, называется размягчением. При одинаковых скоростях охлаждения и нагревания интервал размягчения совпадает

с интервалом стеклования, а температура размягчения T_w оказывается выше температуры стеклования T_g ; в первом приближении принято считать, что $T_w = T_g$. В интервале размягчения также наблюдается перестройка структуры, но несколько иначе, чем при охлаждении. В результате в температурном ходе изменения структуры (и физических свойств) имеет место структурный гистерезис даже при одинаковых скоростях нагрева и охлаждения (рис. 25.4.1).

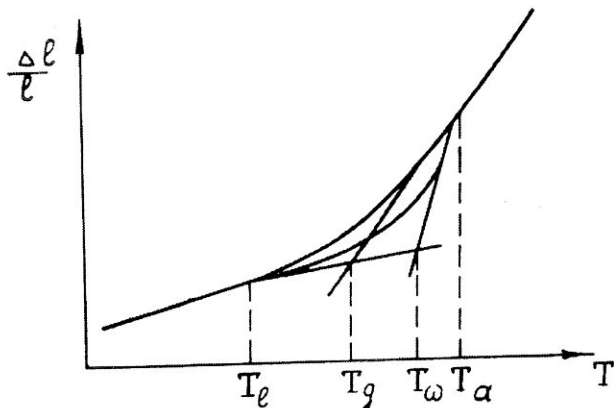


Рис. 25.4.1

При изменении скорости нагрева и охлаждения (при условии сохранения равенства этих скоростей характер зависимости изменения свойств остается тем же самым, но обе кривые смещаются относительно температурной шкалы: при увеличении скорости они смещаются в область высоких температур, а при уменьшении в область низких температур. При стандартной скорости охлаждения нагрева $3^\circ\text{C}/\text{мин}$ (время молекулярной релаксации $T=100$ с), для кварца $T_l=1200^\circ\text{C}$, а $T_a=1500^\circ\text{C}$. Для более высокой вязкости, чем $1012,3$ Па с стекло представляет собой твердое хрупкое тело; при более низкой, чем 108 Па с, стекломасса находится в расплавленном состоянии.

По-видимому, по характеру релаксации напряжений целесообразно разбивать область формирования: центральную область, где время нагрева (охлаждения) значительно больше времени релаксации напряжений; области, прилегающие к центральной, для которых время нагрева (охлаждения) и время релаксации будут соизмеримы, начальный и конечный участок, на которых время нагрева (охлаждения) больше времени релаксации напряжений. Максвелловское время молекулярной релаксации напряжений $\tau = \mu/G$, где μ – коэффициент динамической вязкости

G – модуль сдвига. Для плавленных кварцевых нитей $G_{15^\circ\text{C}} = 5,1 \cdot 10^{10}$ Па и $G_t = G_{15^\circ\text{C}} [1 - \alpha (t - 15)]$, где $\alpha = -11 \cdot 10^{-4} \text{C}^{-1}$, t – температура. Область формирования можно определить как область лежащую между зонами с температурами начала (окончания) процесса размягчения (стеклования).

С другой стороны, областью формирования также называют участок струи, находящийся между сечениями, где происходит уточнение струи стекла и ее скорость движения изменяется от скорости подачи заготовки до скорости вытягивания волокна. Таким образом, последнее определение ограничивает длину области формирования окончанием процесса деформации стекломассы.

Очевидно, что последним определением области формирования более удобно пользоваться при создании математических моделей, которые описывают течение стекломассы в области, где происходит изменение диаметра струи. Поскольку предыдущий подход вносит неопределенность в оценке размеров области формирования из-за неточности определения температур T_1 (T_1') и на завершающей стадии формирования волокна при фиксированной температуре стекломассы возможно значительное изменение как формы, так и температуры струи. Поэтому для удобства дальнейшего рассмотрения процесса вытяжки оптического волокна разделим первое и второе понятие области формирования и определим область деформации, как область формирования, которая дана на основе второго определения.

Типичный вид области деформации приведен на рис. 25.4.2 и ее геометрическая конфигурация в основном зависит от способа нагрева, скорости вытяжки и охлаждения.

При формировании оптического волокна область деформации главным образом проявляет следующие свойства.

1. Самопроизвольная кристаллизация считается нежелательным явлением в технологии изготовления стеклянных волокон. Фазовое разделение приводит не только к ухудшению прозрачности и прочности волокон, но и к нарушению технологических режимов вытяжки. Кварцевое стекло устойчиво к кристаллизации при температурах ниже 1000°C . Температурный интервал кристаллизации приходится на область $1000\text{--}1600^\circ\text{C}$, и максимальная скорость роста кристаллов наблюдается при 1400°C (рис. 25.4.3).

В центральной зоне области формирования процессу фазового разделения и кристаллизации ничто не препятствует, так как в каждом элементарном сечении струи стекломассы температура соответствует состоянию, в то время, как на последних участках области формирования этот процесс прекращается из-за быстрого нарастания вязкости и фиксации струк-

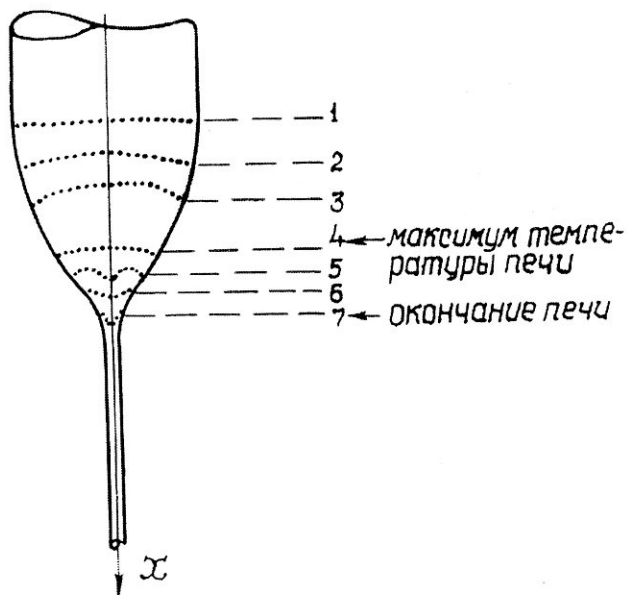


Рис. 25.4.2

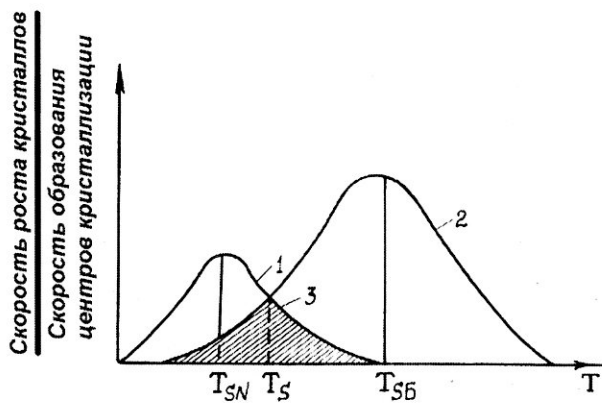


Рис. 25.4.3

туры стекла. Так как для проведения процесса вытяжки стеклянных волокон требуется исключить кристаллизацию стекла, то необходимо, чтобы расплав охлаждался до температуры кристаллизации (рис. 25.4.3) вне центральной зоны области формирования. Последнее реализуется из-за высокой скорости охлаждения стекломассы, потому что фиксация структуры стекла происходит при температурах выше верхнего предела кристаллизации и охлаждения стекла от температуры T_{SB} до T_{SN} происходит за очень короткий отрезок времени (скорость охлаждения в этой области порядка $110\ 103\ C/c$). Отсутствие кристаллизации и молекулярной ориентации вдоль пути деформации позволяет пренебрегать в моделях, описывающих процесс вытяжки, каким-либо рассмотрением кинетики кристаллизации и молекулярной ориентации в состоянии неизотермичности, что без сомнения нельзя делать при вытягивании полимерных волокон.

2. Наличие значительного температурного градиента вдоль пути вытягивания и в поперечном сечении, формирующейся нити, приводит к изменению вязкости вдоль пути вытягивания на 5-6 порядков, а отношение вязкости на поверхности и в центре может лежать в пределах от 0,1 до 60, что в основном является следствием двух причин: наличием температурного градиента в поперечном сечении струи и изменения физических свойств стекла от поверхности к центру из-за введения легирующих элементов для изменения показателя преломления. Большая скорость охлаждения и экспоненциальная зависимость вязкости от температуры приводит к очень короткой длине области деформации, обычно ее длина изменяется от 1 до 15 см.

3. Экспериментальное измерение скорости движения стекломассы, вытекающей из фильеры, в центральном, среднем и периферийном слоях по длине струи показано, что в поперечном сечении струи имеется градиент скорости, причем скорость движения стекломассы понижается от центра к периферии и достигает минимального значения на поверхности. Относительный градиент скорости стекломассы в струе максимальный на выходе из фильеры и уменьшается по ее длине. На заключительной стадии вытягивания волокна эпюры скоростей стекломассы в струе все больше приближается к прямоугольной. Движение жидкости носит послойный ламинарный характер. Наличие градиента скорости в поперечном сечении струи объясняется не только влиянием фильера, но и существованием поперечного градиента температуры, потому что малые изменения температуры могут соответствовать большому изменению вязкости.

Методом визуализации включений было произведено измерение двумерного распределения скорости при вытяжке оптического волокна из заготовки (рис. 25.4.3) наличие радиального градиента скорости объяс-

няется существующим изменением температуры в поперечном сечении заготовки, а следовательно, значительным градиентом вязкости в радиальном направлении.

Исходная осевая скорость движения стекломассы возрастает на 5-6 порядков, а ускорение в 10^9 раз. Средняя скорость и ускорение довольно плавно изменяются в верхней части области деформации. Основное приращение скорости и ускорения происходит на конечном участке области деформации за очень короткий промежуток времени.

4. В области формирования, где радиус струи становится достаточно малым и $|dR(x)/dx| \ll 1$, $(R(x) - \text{функция, описывающая форму границы})$, распределение температуры и скорости с высокой точностью можно считать одномерными.

Для задачи технологии (высокие характеристики и воспроизводимость) необходимо решать совместно: получение высоких характеристик является необходимым, но не достаточным условием технологического процесса. Если первая задача успешно реализуется, то вторая ждет еще своего окончательного решения.

Предлагаемый алгоритм решения второй задачи следующий. С нашей точки зрения наличие воспроизводимости характеристик равносильна корректно поставленному технологическому процессу. При разработке корректного технологического процесса должны быть получены ответы на вопросы относительно: 1) стабильности (управляемости) физико-химических процессов, лежащих в основе технологии; 2) области технологических параметров, где процесс устойчив; 3) передаточных и амплитудно-частотных характеристик в области устойчивости.

Данные три условия аналогичны условиям корректно поставленной математической задачи (существование, единственность, устойчивость). Ответы на поставленные вопросы можно искать различными способами. Отличительной особенностью предлагаемого алгоритма является то, что основные блоки реализуются в процессе численного моделирования и вычислительного эксперимента. Численные эксперименты позволяют сформулировать требования к датчикам и приборам единой системы контроля и диагностики. Резюмируя сказанное, наукоемкие технологии проводятся на основании следующих положений:

1. Физико-химическое моделирование процессов, которые включают в себя тщательное исследование и нахождение оптимальных условий протекания химических и физических процессов на стадии производства исходных материалов и при дальнейшей технологической обработке.

2. Разработка комплексной математической модели технологического процесса для выявления наиболее общих закономерностей его про-

текания. Решение поставленной проблемы еще на стадии проектирования позволяет эффективно выявлять основные факторы, определяющие качество в реальных технологических устройствах, для целенаправленного воздействия на них с задачей оптимизации разрабатываемого оборудования и нахождения законов управления.

3. Компьютеризация технологии, т.е. на основе широкого использования средств вычислительной техники, создание автоматизированных систем управления и контроля, включая разработку специализированных приборов, датчиков и исполнительных механизмов.

Основной частью предлагаемого метода построения процесса является создание математических моделей процессов получения оптического волокна, которая адекватна реальным условиям и доступны детальному аналитическому и численному исследованию.

25.5 Теплофизические процессы в MCVD-методе

Физико-химические процессы, лежащие в основе парофазного метода осаждения (MCVD-метода) условно можно разделить на следующие группы: газодинамические процессы, процессы химического реагирования, конденсация паров, осаждение частиц конденсата, процессы спекания и остеклования [6.11, 6.12, 6.13].

Газодинамические процессы протекают в условиях существенной неравновесности, которая обуславливает наличие явлений переноса: вязкости, теплопроводности и диффузии в многокомпонентной газовой смеси.

При исследовании методов парофазного осаждения наличие областей значительных перегревов приводит к необходимости учитывать сжимаемость газа, несмотря на малые значения числа Маха ($M \leq 0,01$).

Процессы химического реагирования определяют скорость преобразования исходных веществ в продукты реакций и протекают за конечное время. В связи с этим при построении моделей необходимо учитывать кинетику химических реакций. Образовавшиеся в процессе химических реакций пары оксидов кремния, германия и др. находятся в пересыщенном состоянии и конденсируются в объеме газового потока в виде мелкодисперсных частиц. Осажденные частицы образуют пористый слой, при повышении температуры происходит их спекание и остеклование. Этот момент весьма ответственный при производстве заготовок, поскольку необходимо получить возможную однородность в слое или теле.

Характерными особенностями газодинамических потоков в технологических процессах получения заготовок для волоконных световодов

являются их многокомпонентность и двухфазность. Методы описания подобных течений, в рамках феноменологической модели, строятся на введении понятия взаимопроникающих сплошных сред. Каждая компонента (совокупность молекул одного сорта, диспергированные частицы) представляется как сплошная среда, а их совместное сосуществование рассматривается как взаимопроникающее движение, при котором происходит обмен массой, импульсом и энергией между отдельными компонентами. При выводе уравнений, описывающих динамику интересующих нас многокомпонентных двухфазных потоков, сделаны следующие предположения:

1. Газофазные компоненты имеют одинаковые температуры и газодинамическую скорость.;
2. Температура диспергированных частиц равна локальной температуре несущей (газовой) фазы;
3. Средняя скорость частиц равна локальной гидродинамической скорости несущей фазы.

Первое предположение обосновано тем, что массы молекул, газов, используемых в рассматриваемой технологии, имеют один порядок. Второе и третье предположения обоснованы малыми размерами частиц (~500 Å) и интенсивным обменом импульсом и энергией между частицами конденсата и несущим газом. Принятые предположения позволяют рассматривать двухфазный поток, как $(N+1)$ – компонентную смесь, где N – число сортов газообразных веществ, а $(N+1)$ -ая компонента соответствует псевдогазу диспергированных частиц. Анализ кинетики химических реакций окисления хлоридов показывает, что их с достаточной степенью точности можно моделировать реакциями первого порядка, а соотношение между численными значениями предэкспоненциальных множителей и энергией активации позволяет сделать предположение о том, что кластеры критического размера при спонтанной конденсации продуктов реакций образуются за счет объединения молекул SiO_2 , так как скорость реакции окисления хлорида кремния имеет наибольшее значение. Скорость уравнений замыкается цепочкой моментных уравнений функции распределения и соответствующим уравнением состояния. Численный метод решения поставленной задачи основан на расщеплении по физическим процессам.

Наличие в MCVD-методе локализованной области обогрева с характерным значением параметра нагрева (5-6) приводит к заметному влиянию естественной конвекцией на динамику потока внутри опорной трубки. При горизонтальной ориентации трубки наблюдается деформация продольной скорости. Подъемная сила приводит к возникновению значительных (15-20 % от максимальной продольной составляющей) скорос-

ти) поперечных скоростей, которые в области нагрева эта составляющая меняет знак. Результаты выполненных расчетов показали существование нескольких таких колебаний вниз по потоку от зоны обогрева смеси влияние естественной конвекции на динамику потока в горизонтальной трубке уменьшается и при числах $Ra > 150$, $Fr > 0,1$ течение можно считать осесимметричным.

При вертикальном расположении опорной трубки структура осесимметричного потока при прочих равных условиях, определяется направлением протачивания газовой смеси. При спускном течении сила Архимеда имеет направление противоположное вынужденному течению и приводит к торможению прогретых объемов смеси с образованием областей возвратного течения у стенки трубки на входе в зону обогрева и в ядре потока вниз по течению от этой зоны. При восходящем течении подземная сила совпадает по направлению с вынужденным движением и приводит дополнительно к ускорению прогретых объемов смеси. У стенки трубы за областью действия внешней горелки формируется рециркулярное течение, а радиальная составляющая вектора скорости направлена к оси симметрии. Последнее обстоятельство делает схему, основанную на восходящем течении смеси, не перспективной для MCVD-метода получения заготовок.

Химические реакции отклонения хлоридов являются эндотермическими, а при конденсации оксида теплота выделяется, причем суммарный эффект положительный. Выполненные расчеты показывают, что температура смеси за счет этих процессов возрастает в среднем на 8-12%. Расчетные значения диаметров частиц конденсата сравнивались с результатами исследований осажденного порошка на электронном микроскопе. Это сравнение позволило определить эмпирические параметры, входящие в соотношение для скорости образования кластеров критического размера и согласующие в количественном отношении расчет и эксперимент.

Оценка характерных времен спекания показывает, что для частиц кремнезема радиусом 300 Ф (что характерно для MCVD-метода) определяющим будет вязкотекучий механизм. Процесс спекания можно разделить на два этапа. Первый этап начинается формированием контактов между спекающимися частицами и заканчивается в момент превращения связанной сети пустот в систему изолированных пар. На втором этапе происходит дальнейшая эволюция системы пар (обычно схлопывание). Рассчитывая временной ход спекания частиц до момента образования замкнутых пор, определен объем образования пор. Показано, что для условий MCVD-метода время, необходимое для образования однородной стекломассы из осевших частиц оксида кремния, не превышает 2,6 с.

25.6 Моделирование процесса вытяжки оптического волокна в зоне деформации кварцевой заготовки

Оптическое волокно получается путем разогрева заготовки и вытягивания на установках вертикального типа. Далее волокно диаметром 125 мкм проходит через фильеру с полимерной композицией, систему отверждения полимерного покрытия и поступает на устройство намотки и раскладки. Ни в одной из известных нам работ не приводится полная математическая постановка задачи процесса вытяжки ОВ штабиковым методом.

Разработана физическая и математическая модель, базирующаяся на уравнениях количества движения неразрывности и энергии с соответствующими замыкающими соотношениями [6.14, 6.15, 6.16, 6.17]. Наиболее важным для технологов является исследование нестационарных процессов (устойчивость процесса вытяжки, его реакция на внешние возмущения, излучение переходных процесса). При двумерной гидродинамической постановке задачи расчет по полному алгоритму требует чрезвычайно большого количества машинного времени. Поэтому в дальнейшем моделирование процесса вытяжки ОВ при нагреве заготовки в печах достаточно проводить в рамках квазиномерных математических моделей. При построении математической модели делаются предположения о осесимметричности движения, постоянстве физических свойств, за исключением вязкости, которая меняется на несколько порядков. В уравнении энергии учитывалась передача теплоты в зоне деформации за счет конвекции, кондукции и излучения.

Первым шагом численного исследования процесса вытяжки ОВ является решение системы уравнений для установившегося состояния. Исследование температурных режимов вытяжки показало, что основным фактором, определяющим характер течения стекломассы, служит распределение температуры вдоль поверхности нагревательного элемента (НЭ). Существенно увеличение или уменьшение максимальной температуры печи, при одинаковом характере ее распределения по длине, приводят к подобным температурным полям в каждой струе расплаве кварцевого стекла. Теплообмен излучением между поверхностью НЭ и заготовки определяющей при радиусе зоны деформации более 500 мкм. В нижней части области деформации, где радиус струи становится меньше 500 мкм, определяющие роль начинают играть конвективные потери тепла в окружающую среду и теплоотдача за счет выноса массы. Повышение скорости вытягивания, при прочих равных условиях, приводит к возрастанию длины участка деформации. При отсутствии в температурном профиле НЭ отрезка с постоянной температурой наблюдается смещение высокотемпературной час-

ти зоны деформации "ниже по течению" пропорционально скорости вытяжки. В точке перегиба скорости и "ниже по течению" полностью прекращается подогрев расплава кварцевого стекла и наступает резкое охлаждение. Рассмотрение уравнения баланса сил показывает, что сила вытяжения зависит от условий формирования волокна и свойств стекла. Измерение формы струи и силы натяжения и свойств стекла. Измерение формы струи и силы натяжения дает возможность найти распределение температуры вдоль длины области формирования.

Исследование устойчивости процесса формирования светодиодов производится в рамках линейной теории устойчивости. Устойчивость низкотермического процесса вытяжки ОВ исследовалась в зависимости от величины скоростного коэффициента $W = V_s + V_n$ (V_s - скорость вытяжки, V_n - скорость подачи) и температурных условий формирования (числа Стантона (st) и температуры нагревательного элемента). С увеличением W ($st = \text{const}$) устойчивость процесса вытяжки падает, также она существенно зависит от теплового режима печи. Важнейшей стабильностью обладает процесс вытяжки либо при малом значении числа st , либо при практически постоянной температуре поверхности нагревательного элемента.

Результаты расчета наглядно иллюстрируют тот факт, что при любом числе st существует некоторый оптимальный температурный режим работы НЭ с точки зрения устойчивости процесса вытяжки. С увеличением скорости вытяжки при $W = \text{const}$ устойчивость процесса возрастает.

Следующий шаг - определение передаточной функции и амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) процесса в области устойчивости. Выходной характеристикой данного процесса является диаметр. Рассмотренные возмущение воздействия можно расположить в следующем порядке по возрастанию их значимости: возмущение коэффициента внешней теплоотдачи, скорости вытягивания, подачи радиуса исходной заготовки и температуры печи. Реакция процесса вытяжки на флуктуации температуры печи и радиуса заготовки превосходит его реакцию при возмущении скоростей подачи, вытяжки, числа Стантона в 2–10 раз. Процесс формирования ОВ обладает наименьшей инерционностью при различных изменениях скорости вытягивания, поэтому уравнение по данному каналу является наиболее эффективным. Для любого вида возмущающего воздействия при $V_b < 1$ м/с в области деформации фильтруются все колебания с частотой большей 0,5 Гц, а при $V_b = 10$ м/с – 6,5 Гц. Во всех случаях максимум АЧХ находится в интервале 0,1 - 1 Гц, поэтому необходимо особо обращать внимание на стабилизацию температуры печи и радиуса заготовки на низких частотах, так как реакция процесса

вытяжки ОВ для данного типа возмущений наиболее существенна. Для любого вида возмущающего воздействия амплитуда 1-го пика АЧХ определяется температурой и скоростным коэффициентом, а его положение на шкале частот – скоростью натяжки. Высокочастотные колебания радиуса относятся к высокочастотным флуктуациям радиочастотного теплового потока.

25.7 Источники нагрева заготовок для вытяжки оптического волокна

Исследовались три типа нагревательных устройств кислородно-водородные горелки, резистивные графитовые печи и индукционные нагревательные элементы [6.18, 6.19, 6.20, 6.21].

Основным недостатком оптического волокна, получаемого при использовании кислородно-водородной горелки являются значительные (4-8 мкм) аperiодические отклонения диаметра получаемого волокна от заданного. Нами была предпринята попытка создать кислородно-водородные горелки лишённые этого недостатка. Используя инженерный метод расчёта проведена оценка влияния спутности потока, местоположения фронта горелки, по которым определяется расстояние от среза горелки до недеформируемой заготовки. Первое устройство предполагает предварительный нагрев, осуществляемый основным каналом для подачи горючей смеси, а расплавление – внутренним кольцевым каналом, имеющими раздельные коллектора, что позволяет независимо варьировать расходы горючей смеси и коэффициент избытка кислорода в каждом канале. Наличие у внутреннего канала отдельного коллектора позволяет смещать зону максимальной температуры факела внутреннего канала относительно максимума температуры внешнего. Отклонение диаметра составило (1-1,5 мкм) на уровне 125 мкм. При увеличении скорости газа, принудительно подаваемого через канал для продвижения ОВ также снижает разброс диаметра. Помимо этих способов, использовалось воздействие звукового поля на газодинамику потока. Наложение пульсаций давлений на основное течение в зоне разогрева заготовки вызывает появление мелкомасштабных когерентных структур и подавляет процесс образования крупных вихрей, сказывающих дестабилизирующее воздействие на расплавленную часть заготовки. Для эффективного снижения флуктуаций диаметра ОВ частота налагаемых на основное течение колебаний должна быть выше 2 кГц, тогда отклонение диаметра составило (1-2) мкм.

Резистивные печи широко применяются на установках вытяжки оптического волокна. В работе разработана полная тепловая и математи-

ческая модели резистивной печи. Это позволило провести расчеты практически любых конструкций печи. Это позволило провести расчеты практически любых конструкций печей сопротивления. Проведен поиск оптимальной конструкции НЭ. Для снижения температуры НЭ, его образующая внутренней поверхности выбирается таким образом, чтобы обеспечить максимальное значение угловых коэффициентов излучения на поверхность расплава. Для локализации зоны нагрева и уменьшения градиента температуры вдоль поверхности нагревателя наиболее оптимальной является конструкция печи с экранами. Численные расчеты подтверждают возможность активного воздействия на температурный режим печи путем соответствующего подбора ее конструктивных и эксплуатационных параметров.

Для индукционных источников нагрева разработана тепловая и математическая модель. Результаты расчета свидетельствуют о том, что к.п.д. НЭ слабо зависит от радиуса индуктора, длины индуктора, длины нагревательного элемента, радиуса начала загрузки, числа витков индуктора и особенно сильно зависит от сопротивления нагрузки. Тепловой расчет показывает принципиальную возможность изменения температурного режима за счет конструктивных и технологических параметров. На основе проведенных расчетов была разработана и создана индукционная печь для нагрева заготовки при вытяжке ОВ. Результаты экспериментальной проверки индукционной печи демонстрируют хорошие показатели по разбросу диаметра 1–1,5 мкм на уровне 125 мкм.

Основные результаты группы исследователей кафедры теплофизики ЛИТМО в данной области сводятся к следующему.

1. Разработаны подход и принципы построения технологического процесса производства оптического волокна на основе сквозного физического и математического моделирования, обеспечивающие требуемые свойства и высокую повторяемость процесса.

2. В результате реализации математической модели процесса производства заготовок по MCVD-технологии получено, что при горизонтальной ориентации кварцевой трубы подъемные силы приводят к возникновению значительных (15–20% от максимальной продольной составляющей скорости) поперечных скоростей; при вертикальной ориентации и восходящем течении радиальная скорость направлена к оси симметрии.

3. Рассчитан ход спекания частиц до момента образования замкнутых пор, определен объем образовавшихся пор. Показано, что для условий MCVD-метода время, необходимое для образования однородной стекломассы для осевших частиц оксида кремния, не превышает 2,6 с.

4. Разработана физическая и математическая модель процесса вытяжки оптического волокна. Сопоставление экстремальных и расчетных данных показало адекватность модели одноосного растяжения реальному технологическому процессу. Устойчивость течения расплава в зоне деформации существенно зависит от скоростного коэффициента, температурного режима формирования и скорости вытягивания. Увеличение V_v и температуры стекломассы при $W = \text{const}$ приводит к увеличению стабильности вытяжки.

5. Возмущающие воздействия можно расположить в следующем порядке по возрастанию их значимости: возмущение коэффициента внешней теплоотдачи, скорости вытяжки, подачи, радиуса походной заготовки и температуры печи. Для любого вида возмущающего воздействия при $V < 1$ м/с в области деформации фильтруются все колебания с частотой большей 0,5 Гц, а при $V_v = 10$ м/с – 6,5 Гц. Во всех случаях максимум АЧХ находится в интервале 0,1–1 Гц, поэтому необходимо особо обращать внимание на стабилизацию температуры печи и радиуса заготовки на низких частотах. Для любого вида возмущающего воздействия амплитуда 1-го типа АЧХ определяются температурой и скоростным коэффициентом, а его положение на шкале частот – скоростью вытягивания.

6. Разработаны тепловые и математические модели резистивной и индукционной печей для вытяжки ОВ. На основе численного эксперимента разработаны и созданы эти печи с эффективным управлением температурным полем НЭ. Разработан и создан ряд кислородно-водородных горелок для нагрева заготовок, которые по отклонению диаметра ОВ от заданного не уступают резистивным.

7. Проведены экспериментальные исследования на промышленных установках вытяжки оптического волокна «Розенталь», «Алмаз», «Саратов-091». Наибольшие уровни спектральных составляющих колебаний диаметра в диапазоне 0–20 Гц характерны для всех установок вытяжки ОВ, т.е. определяются физическими процессами, а не конструктивными особенностями установок.

8. Разработаны физические и математические модели термо- и фотоотверждающих печей полимеризации, определены их оптимальные конструкции. Исследованы теплофизические, термокинетические и оптические характеристики полимеров.

6.1. Дульнев Г.И., Ярышев Н.А., Испирян Р.А. Теплопроводность при постоянном и импульсном местном нагреве // «Тепло-массообмен при взаимодействии потоков энергии с твердым телом». Вып. 31, Л.: ЛИТМО, 1967.

6.2. Дульнев Г.И., Испирян Р.А., Ярышев Н.А. Тепло- массообмен сублимирующего однородного материала // «Тепло-массообмен при взаимодействии потоков энергии с твердым телом». Вып. 31, Л.: ЛИТМО, 1967.

6.3. Дульнев Г.И., Ярышев Н.А. Тепло-массообмен при взаимодействии мощного импульса энергии с веществом // «Тепло-массообмен при взаимодействии потоков энергии с твердым телом». Вып. 31, Л.: ЛИТМО, 1967.

6.4. Испирян Р.А., Ярышев Н.А. Методы исследования процессов абляции материалов (обзор) // «Тепло-массообмен при взаимодействии потоков энергии с твердым телом». Вып. 31, Л.: ЛИТМО, 1967.

6.5. Дульнев Г.И., Испирян Р.А., Ярышев Н.А. Метод и установка для экспериментального исследования теплозащитных материалов // «Тепло-массообмен при взаимодействии потоков энергии с твердым телом». Вып. 31, Л.: ЛИТМО, 1967.

6.6. Дульнев Г.И., Ярышев Н.А. Оценка процесса тепло-массообмена при взаимодействии импульса энергии с веществом // Теплофизика высоких температур, АН СССР. Т.5. № 2. 1967. С. 322.

6.7. Дульнев Г.И., Тихонов С.В. Теория тепло- и массообмена. Точные методы решения задач теплопроводности и диффузии, учебное пособие. Л.:ЛИТМО, 1981. – 80 с.

- 6.8. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М.: Высшая шк. 1967. – 600 с.
- 6.9. *Дульнев Г.Н., Емец А.Г.* Нанесение информации на лазерный диск для однократной записи (I физическая модель, II математическая модель, III модель образования пита). С-Пб: СПбГИТМО (ТУ), 1994. – 30 с.
- 6.10. *Лыков А.В.* Тепломассообмен. Справочник, М.: Энергия, 1972. – 560 с.
- 6.11. *Васильев В.Н., Воробьев А.Н., Хоружников С.Э.* Математическое моделирование парофазных методов получения высокочистых веществ в волоконно-оптической технологии // *Высокочистые вещества.* № 6. 1988. С. 61–68.
- 6.12. *Александров Л.И., Васильев В.Н. Неуструев Ю.Г., Хоружников С.Э.* Математическое моделирование методов химического парофазного осаждения. – Москва, 1988. 26 с. (Препринт, ИОФАН, № 44).
- 6.13. *Азбель А.К., Васильев В.Н., Хоружников С.Э.* Процессы спекания при производстве заготовок для световодов // *Физика и химия стекла.* Т. 14. № 5. 1988. С. 749–757.
- 6.14. *Васильев В.Н., Дульнев Г.Н., Наумчик В.Д.* Стационарные конфигурации области деформации при вытяжке оптического волокна // *МФЖ.* Т. 53. №3. 1987. С. 496–498.
- 6.15. *Васильев В.Н., Наумчик В.Д.* Стационарные конфигурации области деформации и баланс сил при вытяжке оптического волокна // *ЛМТФ.* № 2. 1988. С.77–84.
- 6.16. *Васильев В.Н., Дульнев Г.Н., Наумчик В.Д.* Нестационарные процессы при формировании оптического волокна. I. Устойчивость процесса вытяжки // *МФЖ.* Т. 55. № 2. 1989. С. 264-292.
- 6.17. *Vasiljev V.N., Dulnev G.N., Naumchic V.D.* The flow of highly viscous liquid with free surface // *Glass Technology.* Vol. 30. № 2. 1989. P. 60-80.
- 6.18. *Васильев В.Н., Дульнев Г.Н., Наумчик В.Д.* Тепловой режим резистив-

ной печи для вытяжки оптического волокна. Обобщенная математическая модель нагревательного устройства // МФЖ. Т. 54. № 2. 1988. С. 248–256.

6.19. *Васильев В.Н., Дульнев Г.Н., Наумчик В.Д.* Тепловой режим резистивной печи для вытяжки оптического волокна. II Результаты математического эксперимента // МФЖ. Т. 54. № 3. 1988. С. 462-468.

6.20. А.с 1369194 (СССР). Нагревательный элемент печи сопротивления для вытяжки оптического волокна / *Васильев В.Н., Наумчик В.Д., Полявская О.М.*

6.21. А.с. 1431265 (СССР). Редукционная печь для вытяжки оптического волокна штабиковым методом / *Васильев В.Н., Наумчик В.Д., Питиримов Б.З., Смекалов П.Р.*

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ИССЛЕДОВАНИЯ СОТРУДНИКОВ КАФЕДРЫ В ДРУГИХ ОБЛАСТЯХ НАУКИ

За долгие годы существования сотрудниками кафедры и проблемной лаборатории решались самые разнообразные задачи. Одни из них были связаны с приборостроением или техническими задачами в области энергетики, другие – оказывались совершенно неожиданными. Например, рассматривались общие проблемы эволюции в Природе или осуществлялись экспериментальные исследования аномальных явлений.

Ниже приводятся аннотации отдельных научных исследований, выполненных сотрудниками кафедры и не относящихся к проблеме «Теплофизика в приборостроении».

1. Строение поверхностного слоя Луны, Марса, Меркурия.

В середине шестидесятых годов XX века перед сотрудниками кафедры была поставлена проблема – предсказать структурное строение поверхностного слоя Луны. Необходимость в решении этой задачи была связана с предстоящей посадкой на поверхность Луны советского космического беспилотного корабля, для чего и потребовались сведения о механических свойствах лунного грунта. Из астрофизических прецизионных измерений температуры во время лунаций было получено значение эффективной теплопроводности поверхностного слоя Луны $\lambda = 0,035 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Предстояло решить обратную задачу: по значению эффективной теплопроводности определить структуру поверхностного слоя Луны и по этим данным предсказать ее механические свойства, так как они определяли конструкцию корабля. Если поверхность представляет из себя глубокий слой пыли, то необходимо снабдить корабль широкими гусеницами, а для более твердой поверхности можно использовать колесное устройство ходовой части корабля.

Для решения этой задачи была разработана теория переноса тепла через смеси различной структуры и найдена теоретическая корреляция между средним коэффициентом теплопроводности материала, его структурой и пористостью. В дальнейшем найденная структура моделировалась на реальных материалах, механические свойства которых определялись экспериментально. Последняя операция была вынужденной, так как в то время по структурным характеристикам теоретически не могли предсказать механические свойства материала – такая задача была решена спустя почти двадцать лет [4].

После посадки космической станции на Луну по фотоснимкам убедились, что свойства были предсказаны правильно [1].

В дальнейшем этот метод был применен для определения свойств грунта таких планет Солнечной системы, как Марс и Меркурий [2].

2. Процессы переноса в неоднородных средах.

В семидесятые и восьмидесятые годы описанный выше прием определения корреляции между переносным свойством (например, теплопроводностью), структурой материала и его пористостью был применен для решения большого числа земных задач. Это привело к развитию целого направления технической физики по теоретическому определению коэффициентов переноса. В 1974 году вышла в свет монография Г.Н. Дульнева и Ю.П. Заричняка [3], посвященная определению таким способом теплопроводности смесей и композиционных материалов. В 1991 году появилась монография Г.Н. Дульнева и В.В. Новикова [4], посвященная определению различных коэффициентов переноса в неоднородных средах. Описанный метод был развит в ней так, что позволил с единых позиций анализировать не только тепло- и электропроводность неоднородных материалов, но и их диффузионные, магнитные, механические свойства в широком диапазоне изменения температур, в условиях наложения различных физических полей, при фазовых переходах и так далее.

3. Сверхпроводниковый турбогенератор.

В начале восьмидесятых годов сотрудники кафедры совместно с ВНИИ «Электромаш» и заводом «Электросила» принимали участие в разработке первого в мире опытно-промышленного сверхпроводникового турбогенератора мощностью 20 МВт и 3000 оборотов ротора в минуту (КТГ-20). В ЛИТМО разрабатывалась система регистрации температурного поля ротора генератора в различных режимах работы. Был реализован оптико-электронный метод измерения температур во вращающемся роторе, охлаждаемым жидким гелием, а также проведено математическое моделирование теплового режима этого объекта [5, 6]. К сожалению, процесс «перестройки», начавшийся в СССР, прервал эти грандиозные работы.

4. Автоматизированное проектирование систем охлаждения.

Примерно в это же время были завершены на кафедре исследования по автоматизированному проектированию системы охлаждения полупроводниковых преобразователей электрической энергии. Речь идет о вентильных устройствах, выпрямителях, полупроводниковых ключах на мощных транзисторах и других устройствах, которые в настоящее время находят широкое применение в различных областях техники. Известно, что с ростом потребления энергии возрастают требования к экономичности, надежности, удобству эксп-

луатации этих устройств. Для удовлетворения этих требований и сокращения времени проектирования была разработана система автоматизированного проектирования, одной из подсистем которой является проектирование конструкций преобразователей и их систем охлаждения [7, 8].

5. Моделирование теплообмена человека.

Упомянем еще об одном направлении исследований в области физиологии. Первые работы относятся к созданию методов и приборов для регистрации тепловых процессов животных и человека, описание которых приведено в главе 21. В дальнейшем эти исследования вызвали желание более глубоко изучить явление теплообмена в организме человека и математически описать этот процесс. Методы математического моделирования теплообмена человека используются при решении различных задач в области медицины, физиологии, спорта конструирования специальной одежды, создания систем жизнеобеспечения замкнутых пространств (отсеков космического корабля, изолированных помещений и так далее).

Этой проблеме посвящено большое количество работ, начиная с 40-х годов XX века. По мере развития вычислительной техники и наличия более подробной информации физиологического характера происходило уточнение этих моделей. В конце пятидесятых годов появилась оригинальная публикация Г.М. Кондратьева о методах проектирования одежды. В дальнейшем появилась серия упоминавшихся выше работ о методах исследования теплообмена теплокровных животных, а в начале восьмидесятых была опубликована серия статей о математическом моделировании тепловых процессов в организме человека. Обзор этих работ приведен в [9].

6. Гелиотехника.

В 1987-89 годах в лаборатории было осуществлено еще одно интересное исследование в области гелиотехники. При проектировании гелиосистем необходим анализ влияния конструктивных и режимных параметров на их теплопроизводительность. При проектировании систем отопления зданий с помощью гелиоустановок требуется знать параметры гелиоустановки, теплообменника, бака-аккумулятора. Кроме того, необходимо рассчитать долю полной тепловой нагрузки за счет солнечной энергии с учетом метеорологических особенностей местности. Была реализована математическая модель солнечной установки и составлены необходимые программы. Была также разработана конструкторская документация, спроектирован солнечный коллектор и материально реализована одна из таких систем [7.10-7.12]. Однако последующие события в СССР не позволили в промышленном масштабе реализовать эти планы.

8. Тепловые трубы.

В конце 60-х годов XX века в различных областях техники стал применяться новый тип теплоотвода – тепловая труба. Это устройство позволяло с высокой эффективностью решать следующие задачи: переносить большое количество теплоты при малых перепадах температур и минимуме тепловых потерь; разделять в пространстве тепловой поток по нескольким трактам с различной нагрузкой; трансформировать плотность теплового потока, то есть увеличивать ее или уменьшать; выравнивать или регулировать температуру объекта; реализовывать устройство с функцией теплового диода и так далее. В тепловых трубах охвачен диапазон температур от гелиевых до 3000 °С. Области применения тепловых труб включают в себя атомную энергетику, космическую технику, турбостроение, криогенную технику, электронику и радиотехнику, гражданское строительство, пищевую промышленность и так далее.

На кафедре разработана более общая конструкция тепловой трубы – так называемая газорегулируемая тепловая труба (ГРТТ). Это устройство состоит из обычной тепловой трубы и дополнительного резервуара с неконденсирующимся газом. В нерабочем состоянии тепловой трубы газ наравне с парами жидкости равномерно распределен по всему объему парового пространства. При подведении теплового потока к зоне испарения пары теплоносителя оттесняют неконденсирующийся газ в зону конденсации, где образуется поверхность раздела пар-газ, и зона конденсации делится на две регулируемые части. При этом изменяется площади конденсационной зоны. Следовательно, ГРТТ является управляемой тепловой трубой и обладает большими возможностями.

На кафедре был рассмотрен сложный динамический режим работы ГРТТ, реализован комплексный подход при анализе теплового режима объектов с регулируемой или термостатируемой температурой. Результаты исследований изложены в 1985 году в книге [13]. В ней приведены основы теплового расчета систем термостатирования при различных дестабилизирующих воздействиях, рассмотрено термостатирование отдельных элементов и узлов электронной аппаратуры.

9. Синергетика.

В индустриальную эпоху развития цивилизации (XV-XX века) были заложены основы современной науки, которая впоследствии была названа европейской наукой. В ней преимущественно рассматривается только устойчивый период развития Природы, хотя наряду с ним известны и неустойчивые состояния эволюции. Законы их развития, то есть более широкий взгляд на эволюцию, рассматривается в новой науке – синергетике. Законы синергетики применимы к развитию как космо-

го, так и живого, и социального миров. Применение синергетики к социальным явлениям позволяет по новому взглянуть на причины разрушительных процессов в обществе в период его неустойчивого развития, объяснить с неожиданной стороны возникновение общественных катаклизмов, которые произошли в СССР в годы перестройки.

Законы синергетики позволяют найти неожиданные решения по проектированию устойчиво работающих систем в неустойчивых режимах, например, при проектировании ядерных реакторов. Синергетика возникла из двух научных дисциплин: термодинамики открытых систем и математической теории катастроф и привела к так называемому универсальному эволюционизму. Ее можно рассматривать как новую научную парадигму, к сожалению, еще мало известную в общественных и научных кругах. Одна из причин этого связана со сложностью изложения идей синергетики в научной литературе, с чрезмерной математизацией материала.

Стремление познакомить студентов и широкий круг специалистов с идеями синергетики привели нас к работе над монографией на эту тему, которая вышла в свет в 1998 году и стала основой учебного курса «Синергетика» на ряде факультетов университета [14].

10. Энергоинформационный обмен в Природе.

В конце семидесятых годов вокруг проблемной лаборатории объединились ряд научных коллективов из ЛИТМО и других учреждений для решения проблемы: «Существует ли «тонкий мир»?»

Большинство ученых индустриального периода цивилизации (XV-XX века) считали, что окружающая нас Природа сугубо материальна, то есть ее развитие целиком описывается законами физики, химии, биологии. В обществе этого периода господствовала материалистическая философия, которая признавала первичность материи – объективной реальности и рассматривает сознание как свойство материи.

Однако, в литературе неоднократно описывались случаи воздействия сознания на материальные объекты (телекинез), передачи информации нетрадиционным способом (телепатия). Под нетрадиционным способом передачи информации подразумевают перенос сведений без участия обычных органов чувств, а также электромагнитных, акустических, температурных волн и материальных способов передачи.

С загадками сознания связаны явления ясновидения, лозоходства и другие необычные феномены. В научной литературе обычно отрицаются эти явления, и их относят к предрассудкам, мракобесию, лженауке. Однако, нельзя просто налепить ярлык и отмахнуться от проблемы: «Существуют эти явления или нет?»

Как уже упоминалось, начиная с 1978 года, группа физиков разных специальностей их ЛИТМО и медиков из Военно-медицинской академии им. С.М. Кирова в течение ряда лет экспериментально изучала эти явления. На основании физических и медицинских экспериментов был установлен факт объективно существующих явлений телекинеза и телепатии. Результаты этих работ были широко опубликованы и в 2000 году вышли отдельной книгой [15]. Эти эксперименты имеют принципиальное значение и говорят, что Природа более разнообразна и, кроме грубого материального мира, содержит так называемый тонкий мир.

Итак, переход из одного тысячелетия в другое, из XX века в XXI, из эры Рыб в эру Водолея, наверное, будет связан с изменением научной парадигмы. По крайней мере, два таких изменения уже упомянуты: новый взгляд на эволюцию Природы (универсальный эволюционизм) и расширение рамок представлений о Природе, то есть существование тонкого мира.

1. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П., Муратова Б.Л. О возможной структуре поверхностного слоя Луны // Изв. высш. уч. зав. «Радиофизика», Горький: Горьковский университет. Т. IX. №5. 1966. С. 849-857.

2. Волков Д.П., Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П., Муратова Б.Л. О прогнозировании структуры поверхностного слоя планет Марса и Меркурия // Изв. высш. уч. зав. «Радиофизика», Горький: Горьковский университет. Т. XX. №1. 1977. С. 45-50.

3. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: «Энергия», 1974. – 244 с.

4. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: «Энергоатомиздат», 1991. – 246 с.

5. Глебов И.А., Дульнев Г.Н., Потягайло А.Ю., Сигалов А.В. Математическое моделирование теплового режима ротора криотурбогенератора // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. №2. 1982. С. 70-78.

6. Глебов И.А., Дульнев Г.Н., Данилевич Д.Б., Журавлев Г.С., Чернопольский-А.Д. Измерительная система для вращающихся криостатов // Электротехника. №2. 1983. С. 46-48.

7. Ага О.Б., Дульнев Г.Н., Перевезенцев А.А., Польщиков Б.В. Автоматизированное проектирование полупроводникового модуля // Инженерно-физический журнал. Ноябрь. Т. XLIII. №5. Минск. 1982. С. 841-847.

8. Ага О.Б., Дульнев Г.Н., Польщиков Б.В. Расчет и проектирование радиа-

торов воздушной системы охлаждения группы приборов // Инженерно-физический журнал. Январь. Т. XLIV. №1. Минск. 1983. С. 99-105.

9. Дульнев Г.Н., Короткевич М.М., Польщиков Б.В., Пиллипиенко Н.В., Сигалов А.В. Математическое моделирование процесса теплообмена в организме человека // ИФЖ. Январь. Т. XLVI. №1. Минск: изд. «Наука и техника». 1984. С. 150-160.

10. Беляков А.П., Дульнев Г.Н, Савинцева Л.А., Сахова Е.В. Математическая модель гелиоконтра для горячего водоснабжения // Гелиотехника, Ташкент: изд-во ФАН. №3. 1989. С. 34-39.

11. Беляков А.П., Дульнев Г.Н, Савинцева Л.А., Сахова Е.В. Выбор положения цилиндрического приемника в плоском фоклине // Гелиотехника, Ташкент: изд-во ФАН. №4. 1989. С. 16-18.

12. Беляков А.П., Дульнев Г.Н, Савинцева Л.А., Сахова Е.В. Математическая модель гелиоконтра для системы отопления // Гелиотехника, Ташкент: изд-во ФАН. №6. 1989. С. 25-28.

13. Беляков А.П., Дульнев Г.Н. Тепловые трубы в электронных системах стабилизации температуры. М.: Радио и связь. 1985. – 95 с.

14. Дульнев Г.Н. Введение в синергетику. СПб: «Проспект». 1998. – 256 с.

15. Дульнев Г.Н. Энергоинформационный обмен в Природе. СПб: СПбГИТМО (ТУ). 2000. – 135 с.

ОСНОВНЫЕ ДАТЫ ЖИЗНИ И НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ АВТОРОВ МОНОГРАФИИ

Георгий Михайлович Кондратьев

Родился 5 мая 1887 года в Крыму.

1912 – окончил физико-математический факультет Петербургского университета.

1914–1918 – служба в действующей армии.

С 1918 года работал и учился на физико-механическом факультете Петроградского политехнического института.

С 1924 года – заведующий термометрической лабораторией и лабораторией низких температур в Главной палате мер и весов (ныне - ВНЦ «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»).

С 1927 года – работа по совместительству в Государственной физико-технической лаборатории.

1936 – издание монографии «Испытания на теплопроводность по методам регулярного режима».

1939 – защита в Московском энергетическом институте диссертации по теме «Испытание на теплопроводность по методам регулярного режима», представленной на соискание ученой степени доктора наук .

1948 – присуждение за разработку новых методов и приборов Сталинской премии.

1954 – публикация монографии «Тепловой регулярный режим режим».

1938–1958 – заведующий кафедрой теплосилового контроля в ЛИТМО.

1948–1952 – декан инженерно-физического факультета ЛИТМО.

1957 – издание учебника «Тепловые измерения».

С 1932 года – председатель теплоизоляционной секции ВНИТО «Энергетика».

С 1957 года – руководитель научно-исследовательской лаборатории в ЛИТМО

Умер 11 августа 1958 года.

Основные научные публикации

Испытания на теплопроводность по методам регулярного режима. Монография. 1936.

Тепловой регулярный режим. Монография. 1954.

Тепловые измерения. Учебник. 1957.

Геннадий Николаевич Дульнев

Родился 3 мая 1927 года в Новокубанске Краснодарского края.

1935–1944 – обучение в средней школе.

1944–1950 – обучение в ЛИТМО на инженерно-физическом факультете.

1950–1953 – обучение в аспирантуре на кафедре тепловых приборов.

1953 – защита диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

1958 – защита диссертации «Теплообмен в системах с источниками энергии» на соискание ученой степени доктора технических наук.

1958–1995 – заведование кафедрой теплофизики ЛИТМО.

1974–1986 – работа в должности ректора ЛИТМО .

С 1990 – директор Центра энергоинформационных технологий.

С 1995 – профессор кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга СПбУ ИТМО.

Основные научные публикации

Теплообмен в радиоэлектронных устройствах. Л.: Госэнергоиздат, 1963.-288 с. (соавтор – Э.М. Семяшкин).

Тепловые режимы радиоэлектронной аппаратуры. Л.: Энергия, 1968. 300 с.(соавтор – Н.Н. Тарновский).

Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1984. 246 с.

Теплопроводность смесей и композиционных материалов, Л.: Энергия, 1974. 260 с. (соавтор – Ю.П. Заричняк).

Методы расчета теплового режима приборов, М.: Радио и связь, 1990. 311 с. (соавторы – В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов).

Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоиздат, 1991. 245 с. (соавтор – В.В. Новиков).

Введение в синергетику: Учеб. Пособие. СПб.: Проспект, 1998. 256 с.

Энергоинформационный обмен в природе, СПб.: ГУИТМО, 2000, 136 с.

Механика жидкостей газов, учебное пособие, СПб.: ГУИТМО, 2001, 187 с.

Евгений Степанович Платунов

Родился 27 ноября 1930 года, в дер. Белая Речка Уржумского района Кировской области РСФСР.

1938-1948 – обучение в школе.

1948-1954 - обучение в ЛИТМО на инженерно-физическом факультете.

1954-1957 - работа в ГОИ им. С.И. Вавилова в области оптической пиromетрии.

- 1964–1970 – заместитель декана по научной работе
1969 – защита диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук
1970–1973 – профессор кафедры теплофизики ЛИТМО
1977–1980 – декан инженерно-физического факультета ЛИТМО
1980–1985 – проректор по учебной работе ЛИТМО
1980–2000 – заведующий кафедрой физики СПб ГИТМО (ТУ)
1993–1997 – декан естественнонаучного факультета СПб ГИТМО (ТУ)
С 2002 – профессор кафедры физики СПбГУ ИТМО

Основные научные публикации

- Теоретические основы измерения нестационарных температур. Л.: Энергия, 1967. – 300 с.
Точность контактных методов измерения температуры. М.: Издательство стандартов, 1976. – 232 с. (соавторы – А.Н. Гордов, Я.В. Малков, Н.Н. Эргардт).
Справочник конструкторов РЭА. Общие принципы проектирования. М.: Советское радио, 1980. – 480 с. (соавтор)
Температурные измерения. Справочник. Киев: Наукова думка, 1984. – 496 с. (соавторы – Геращенко О. А., Гордов А.Н, Лах В.И., Стандык Б.И.)
Тепловой расчет термостатов. Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 176 с. (соавтор – Андреева Л.Б.)
Температурные измерения. Справочник. Киев: Наукова думка, 1989. – 704 с. (соавторы – Геращенко О.А., Гордов А.Н., Еремина А.К. и др.)
Теоретические основы измерения нестационарной температуры. – 2-е изд., перераб. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

Предисловие.....	5
Георгий Михайлович Кондратьев (краткий очерк).....	16
Раздел первый. Регулярный тепловой режим	
Введение.....	23
Глава 1. Элементарная теория тепловой инерции тел.....	25
1.1. Вывод основного уравнения.....	25
1.2. Решение основного уравнения тепловой инерции.....	26
1.3. Первый типичный случай проявления тепловой инерции: простое нагревание или охлаждение тела.....	28
1.4. Второй случай: нагревание тела в среде с линейно изменяющейся температурой.....	29
1.5. Третий случай: температура среды изменяется во времени по гармоническому закону.....	31
Глава 2. Теория регулярного теплового режима.....	35
2.1. Основная теорема теории регулярного теплового режима.....	35
2.2. Определение регулярного теплового режима.....	38
2.3. Теоремы Г. М. Кондратьева.....	40
2.4. Анализ температурного поля простейших тел в стадии регулярного режима.....	44
2.5. Обобщенная зависимость между темпом охлаждения тела и воздействием на него внешней среды.....	47
2.6. Коэффициент формы тела.....	53
2.7. Регулярные тепловые режимы второго и третьего рода.....	55
Глава 3. Применение теории регулярного теплового режима к системам тел.....	58
3.1. Основная теорема о регулярном тепловом режиме системы тел.....	58

3.2. Общий метод аналитического решения задач о системе тел.....	59
3.3. Двухсоставная система тел типа "ядро-оболочка".....	61
Глава 4. Регулярный тепловой режим двухсоставных систем тел простейшей формы.....	64
4.1. Двухсоставной шар.....	64
4.2. Двухсоставная симметричная пластина.....	68
Глава 5. Регулярный тепловой режим трехсоставных тел.....	69
5.1. Охлаждение простейшей трехсоставной системы.....	69
5.2. Тепловой регулярный режим в системе "теплоизоляционное ядро-зазор-оболочка".....	71
5.3. Частные случаи системы тел "ядро-зазор-оболочка".....	73
Глава 6. Регулярный тепловой режим тел с источниками энергии.....	76
6.1. Идея о регуляризации температурного поля системы тел с источниками энергии.....	76
6.2. Темп нагревания тела и критерий неравномерности температуры.....	79
Глава 7. Длительность дорегулярного теплового режима.....	82
7.1. Температурное поле тела без источников энергии.....	82
7.2. Температурное поле тел с источниками энергии.....	86
7.3. Регуляризация температурного поля в системах тел.....	87
Литература.....	92
Раздел второй. Приближенные методы анализа краевых задач теплопроводности	
Введение.....	94
Глава 8. Обобщенные одномерные модели процессов нестационарной теплопроводности.....	97
8.1. Классификация моделей теплопроводности.....	97

8.2. Одномерная модель нестационарной теплопроводности объекта при комплексных тепловых воздействиях.....	103
8.3. Приближенные передаточные функции. Дифференциальные уравнения взаимосвязи между температурой объекта и тепловыми воздействиями.....	114
Глава 9. Нестационарная теплопроводность сплошных и полых однородных тел.....	119
9.1. Теплопроводность объекта при интенсивном теплообмене со средой.....	119
9.2. Передаточные функции для температуры тела в условиях конвективно-лучистого теплообмена.....	129
9.3. Параметрические взаимосвязи между температурами и критериальными характеристиками теплопроводности.....	136
9.4. Факторы формы тел в многомерных задачах нестационарной теплопроводности.....	144
9.5. Температурное поле объектов с внутренними адиабатически изолированными полостями.....	149
Глава 10. Приближенные модели теплопроводности оболочек и полых тел.....	153
10.1. Математическая модель теплообмена оболочек.....	153
10.2. Приближенное уравнение теплообмена и передаточные функции стенок и полых тел.....	156
10.3. Модели теплообмена неоднородных объектов.....	165
Глава 11. Метод осреднения в задачах стационарной теплопроводности.....	175
11.1. Решение основных краевых задач для уравнения Пуассона.....	175
11.2. Уточнение приближенного решения (второе приближение).....	179
11.3. Приближенное построение функции Грина.....	183
11.4. Частные решения для параллелепипеда с источниками тепла.....	190
11.5. Метод Акаева-Дульнева.....	197

Глава 12. Приближенные методы определения собственных функций и собственных чисел.....	204
Глава 13. Применение приближенных методов к нестационарным задачам теплопроводности.....	210
13.1. Нагревание тела.....	210
13.2. Призма с источниками.....	212
Литература.....	218
Раздел третий. Методы и средства определения теплофизических свойств материалов	
Введение.....	223
Глава 14. Теория регулярных методов определения теплофизических свойств.....	228
14.1. Исходные положения.....	228
14.2. Калориметры без оболочки.....	231
14.3. Калориметры с оболочкой.....	244
14.4. Калориметры с ядром.....	250
14.5. Границы линейности методов регулярного режима.....	260
Глава 15. Типовые схемы калориметров регулярного режима.....	268
15. 1. Исходные сведения	268
15. 2. Типовые ячейки акалориметров.....	271
15.3. Типовые ячейки микрокалориметров	275
15.4. Типовые ячейки бикалориметров	
Глава 16. Основы теории динамических методов определения теплофизических свойств.....	284
16.1. Исходные положения.....	284
16.2. Стержень, разогреваемый внутренним тепловым источником.....	285
16.3. Пластина, цилиндр и шар при симметричном монотонном разогреве.....	287
16.4. Пластина в режиме несимметричного разогрева.....	290

16.5. Полый цилиндр при радиальном разогреве.....	293
16.6. Двухслойная пластина при одностороннем разогреве.....	294
16.7. Стержень, разогреваемый с торца при наличии бокового теплообмена.....	298
16.8. Границы линейности методов монотонного режима.....	300

Глава 17. Типовые режимы калориметров монотонного режима....

17.1. Исходные сведения.....	305
17.2. Динамические α -калориметры	308
17.3. Динамические λ -калориметры.....	315
17.4. Динамические c -калориметры.....	321
17.5. Комплексные динамические калориметры.....	326
17.6. Вспомогательные блоки динамических калориметров.....	330

Литература.....

333

Раздел четвертый. Термостатирование приборов, изменение температуры и теплового потока

Введение.....

338

Глава 18. Тепловые модели термостатирования объектов.....

342

18.1. Требования к точности обеспечения температурного режима объектов.....

346

18.2. Тепловые модели и основные задачи расчета термостатов.....

350

18.3. Элементарная теория термостатирования.....

353

18.4. Передаточные функции и уравнения взаимосвязи для температуры объекта в камере термостата.....

358

18.5. Стационарные режимы теплообмена.....

361

18.6. Переходные и циклические тепловые процессы в объекте и камере термостата.....

364

18.7. Динамика теплообмена разомкнутой системы терморегулирования.....

369

18.8. Прохождение периодических сигналов (температурных волн) через элементы термостата.....

369

Глава 19. Проектирование термостатирующих устройств.....	371
19.1. Базовая модель термостата и выбор способа отвода теплоты	371
19.2. Уточнение формулировки тепловых моделей термостатов.....	376
19.3. Расчет и компенсация влияния локальных тепловых связей.....	378
19.4. Использование результатов исследований в учебном процессе.....	380
Глава 20. Теоретические основы измерения нестационарной температуры.....	382
20.1. Основные понятия и определения	
20.2. Общая схема теплообмена измерительного преобразователя температуры.....	384
20.3. Математические модели и характеристики теплообмена термопреобразователей.....	387
20.4. Схема измерений и простые модели теплообмена термопреобразователей.....	391
20.5. Модель теплообмена, статические и динамические характеристики однородных термопреобразователей	395
20.6. Составляющие суммарной погрешности измерения температуры среды.....	399
20.7. Оценка влияния различных факторов на точность измерения температуры.....	402
20.8. Методические погрешности измерения температур поверхности и внутри тела.....	406
Глава 21. Регистрация нестационарных тепловых потоков.....	408
21.1. Тепломеры типа вспомогательной стенки.....	408
21.2. Методические основы работы динамических калориметров.....	413
21.3. Анализ теплового режима калориметрического устройства.....	418
21.4. Определение теплоты гидратации цемента.....	423
21.5. Приборы (биокалориметры) при исследовании теплообмена теплокровных животных.....	425
Литература.....	428

Раздел пятый. Тепловые режимы радиоэлектронных, электронных, оптико-электронных и оптических приборов

Введение	438
Глава 22. Тепловые режимы радиоэлектронных и электрических устройств	441
22.1. Тепловые модели радиоэлектронных аппаратов.....	441
22.2. Математические модели РЭА.....	447
22.3. Приближенные методы анализа температурных полей.....	453
22.4. Метод поэтапного моделирования.....	455
22.5. Естественное охлаждение перфорированных блоков и кассет.....	460
22.6. Нетрадиционные методы охлаждения радиоэлектронной аппаратуры.....	463
Глава 23. Тепловые режимы оптико-электронных и оптических приборов	466
23.1. Уровни иерархии оптико-электронных и оптических приборов и термооптические процессы в осветителе.....	466
23.2. Термооптические процессоры в зеркально-линзовых системах.....	470
23.3. Поэтапное моделирование термооптических процессоров.....	477
Литература	483

Раздел шестой. Тепломассообмен процессов в материалах с фазовыми превращениями

Введение	489
Глава 24. Теплообмен при интенсивных тепловых воздействиях	491
24.1. Время достижения температур плавления и испарения. Толщина прогреваемого слоя.....	491
24.2. Процесс уноса сублимированного материала.....	496
24.3. Экспериментальные исследования теплозащитных свойств материалов.....	497
24.4. Нанесение информации на лазерный диск.....	500

Глава 25. Вытяжка оптического волокна.....	505
25.1. Теплообмен при производстве оптического волокна.....	505
25.2. Методы получения заготовки. Осаждение из газовой фазы.....	507
25.3. Вытяжка, область формирования и защита оптического волокна...513	
25.4. Область формирования кварцевого оптического волокна.....	514
25.5. Теплофизические процессы в MCVD-методе.....	520
25.6. Моделирование процесса вытяжки оптического волокна в зоне деформации кварцевой заготовки.....	523
25.7. Источники нагрева заготовок для вытяжки оптического волокна...525	
Литература.....	528
Заключение. Исследования сотрудников кафедры в других областях науки.....	531
Основные даты жизни и научно-педагогической деятельности авторов монографии.....	539

Наименования предыдущих книг серии

Г.Н. Дульнев. Энергоинформационный обмен в природе. 2000. – 134 с.

А.В. Сечкарев. Фотонная оптика. 2000. – 220 с.

В.С. Игнатовский. Элементарные основы теории оптических приборов. 2001. – 202 с.

К.Г. Коротков. Основы ГРВ биоэлектрографии. 2001. – 360 с.

В.Н. Чуриловский. Основы теории оптических приборов. 2001. – 274 с.

Ю.Г. Шнейдер. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. 2001. – 264 с.

В.С. Меськин. Основы легирования стали. 2002. – 236 с.

Э.И. Слив. Прикладная теория инерциальной навигации. 2002. – 132 с.

**Георгий Михайлович Кондратьев
Геннадий Николаевич Дульнев
Евгений Степанович Платунов
Николай Алексеевич Ярышев**

**ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА:
Теплообмен
в приборостроении**

В авторской редакции
Компьютерная верстка
Дизайн обложки серии
Автор проекта серии

Е.Г. Кузьмина
В.А. Петров
М.И. Потеев

Подписано в печать 11.11.03. Формат А5. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Тираж 200 экз. Заказ № 97.

Санкт-Петербургский
государственный университет
информационных технологий,
механики и оптики
Лицензия ИД №00408 от 05.11.99
197101, СПб, ул. Саблинская, 14

Издательство «ИВА»
Лицензия ИД №00705 от 17.01.2000
197348, СПб, ул. Аэродромная, 4.