

В.П. Первадчук, Д.Б. Владимирова

Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, Пермь, Российская Федерация

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ЖАКЕТИРОВАНИЯ КВАРЦЕВЫХ ТРУБ

Изучаются подходы к управлению технологическим процессом жакетирования кварцевых заготовок, заключающемуся в последовательном наложении чистой кварцевой трубы на сердечник, их схлопывании и масштабировании в условиях температурных воздействий и перепада давления. Целью исследования является получение управляющих решений технолога в форме зависимостей между геометрическими характеристиками жакетных труб, величин воздушных зазоров между трубой и сердечником, скоростью термоэлемента (горелки) и расходом газовой смеси. Исследование опирается на математические модели тепломассопереноса в форме двумерных и квазиодномерных краевых задач. Модели учитывают наличие подвижного источника тепла в предположении, что расход газовой смеси в таком источнике – горелке изменяется во времени, а значит, может являться управляемым параметром процесса. Система уравнений, описывающая процесс посадки жакетной трубы на сердечник, сильно нелинейная за счет претерпевающей достаточные изменения вязкости расплава кварца, а также учтенных в модели видов теплообмена – конвективного и лучистого. Для решения описанных постановок используется метод конечных элементов, реализуемый в среде мультифизического моделирования Comsol Multiphysics. Решение проводится методом конечных элементов, полученные в результате численного моделирования технологические номограммы являются готовыми управленческими технологическими решениями для выбора уставок при осуществлении всех этапов процесса жакетирования. Полученные результаты могут позволить осуществлять быструю корректировку значений параметров во время осуществления всех технологических режимов процесса жакетирования – на этапе травления кварцевой трубы, этапе ее полировки, посадки жакета на сердечник и непосредственно при масштабировании системы труб.

Ключевые слова: кварцевые трубы, производство кварцевых заготовок, жакетирование, управление процессом жакетирования, тепломассоперенос, технологические номограммы, краевые задачи, метод конечных элементов.

V.P. Pervadchuk, D.B. Vladimirova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

PROCESS CONTROL FOR JACKETING QUARTZ TUBES

The approaches to control of the technological process of jacketing of quartz blanks are studied, which consists in successive imposition of a clean quartz tube on the core, their collapse and scaling under temperature effects and pressure drop. The aim of the study is to obtain control solutions of the technologist in the form of dependencies between the geometric characteristics of the jacket tubes, the values of the air gaps between the tube and the core, the speed of the thermoelement (burner) and the flow rate of the gas mixture. The study is based on mathematical models of heat and mass transfer in the form of two-dimensional and quasi-one-dimensional boundary value problems. The models take into account the presence of a moving heat source under the assumption that the flow rate of the gas mixture in such a source - the burner, changes over time, and therefore can be a controlled parameter of the process. The system of equations describing the process of fitting a jacket tube onto a core is highly nonlinear due to the viscosity of the quartz melt undergoing sufficient changes, as well as the types of heat exchange taken into account in the model – convective and radiant. To solve the described statements, the finite element method implemented in the Comsol Multiphysics multi-physical modeling environment is used. The solution is carried out using the finite element method, the technological nomograms obtained as a result of numerical modeling are ready-made management technological solutions for selecting settings during all stages of the jacketing process. The obtained results can allow for quick adjustment of parameter values during all technological modes of the jacketing process – at the stage of etching the quartz tube, the stage of its polishing, fitting the jacket onto the core, and directly during scaling of the pipe system.

Keywords quartz tubes, production of quartz blanks, jacketing, jacketing process control, heat and mass transfer, process nomograms, boundary value problems, finite element method.

Введение

Оптические волокна нашли свое применение во многих областях – в задачах телекоммуникаций, медицинских технологиях, различных сферах промышленности. Все этапы производства волокон неизбежно сталкиваются с различными проблемами, связанными как с трудностью выполнить на практике все условия реализации высокоточных процессов, следующих друг за другом, так и с качеством сырья. В рамках данного исследования изучался один из ключевых этапов производства волокон – процесс наложения кварцевой трубы на сердечник. Наиболее известными технологиями наращивания толщины кварцевой трубы являются метод наружного парофазного осаждения, SAND-технология, при которой утолщение сердцевины производится путем обсыпания ее внешней поверхности и последующей термообработки мелкими частицами кварца [1, 2], процесс жакетирования, заключающийся в сплавлении двух труб, вложенных друг в друга (жакетная тру-

ба и сердечник) [1–4], а также близкие в смысле своей реализации к процессу жакетирования его модификации – технологии RIT и RIC, позволяющие одновременно и утолщать заготовку, и тянуть из нее волокно [5, 6]. К альтернативным методам, аналогичным процессу жакетирования, можно отнести предложенные Alcatel и Lucent методы наложения оболочки на сердечник путем плазменного распыления кварцевого порошка, а также с использованием золь-гель технологии [1, 7]. Конструкция одномодовых световодов такова, что несущая свет сердцевина количественно составляет небольшую долю от всего объема волокна. Оболочка при этом определяет лишь его механические свойства. Процесс жакетирования либо его аналоги позволяет нарастить объем заготовки и, как следствие, в достаточной мере увеличить производительность. С процессом жакетирования связаны всемирно известные концерны, такие как Heraeus, Silitec Fibers, Nextrom, Draka, General Electric, упомянутые выше Alcatel, Lucent и др. Часть из них занимается непосредственным производством жакетных труб, часть вовлечена в реализацию технологических процессов наложения трубы на сердечник [8]. Классическая схема жакетирования кварцевых заготовок, реализуемая большинством компаний, представляет последовательный цикл, в котором жакетная труба вытягивается из стандартного трехсотмиллиметрового кварцевого цилиндра, далее внутри него вставляется стержневая заготовка – сердечник, изготовленная методом MCVD или PCVD, затем путем нагрева и управления создаваемым внутри давлением внешняя (жакетная) труба претерпевает геометрическую трансформацию и сажается на сердечник, после чего переходят непосредственно к вытягиванию волокна. Другая технология – технология RIC® (Rod-In-Cylinder) изначально была разработана Heraeus, но с течением времени приобрела ряд модифицированных форм (рис. 1). Онлайн RIC-технология позволяет не разделять процесс жакетирования и вытяжки, как это предусмотрено в классической схеме жакетирования, имея при этом объем выхода готовой продукции в среднем в пять раз выше в рамках одного производственного цикла (см. рис. 1). Heraeus предложили заменить жакетные трубы качественными цилиндрами собственного производства с низким содержанием гидроксидов, диаметр которых варьируется от 0,12 до 0,2 м [9]. Легированная часть стержневой заготовки при этом должна быть в диаметре около 10 мм, что больше, чем при использовании жакетной трубы. Низкое содержа-

ние гидроксила в кварце F300 и на поверхности между стержневой заготовкой и RIC-цилиндром позволяет уменьшить расстояние в волокне между его сердцевиной и жакетным материалом, а значит, уменьшить отношение диаметра стержневой заготовки к диаметру её сердцевины [10]. Это ведёт к более экономному использованию стержневой заготовки, так как из стержневой заготовки одной и той же массой можно произвести больше волокна.

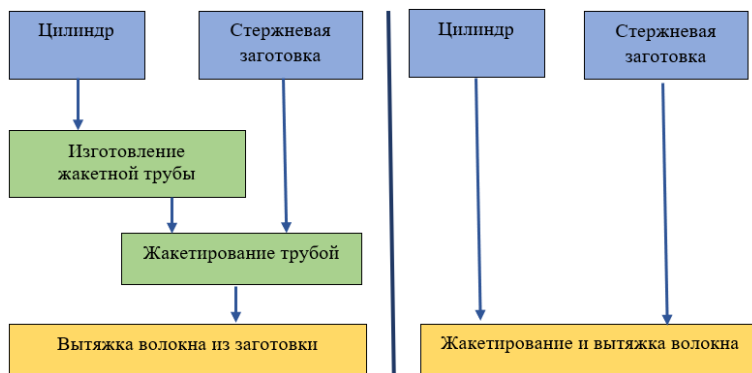


Рис. 1. Общие схемы технологических процессов наложения кварцевой оболочки на сердечник: жакетирование кварцевой заготовки (а) и Online-RIC технология (б)

Подводя итог краткого обзора имеющихся на сегодняшний день технологий для решения задачи об утолщении кварцевой заготовки, необходимо отметить, что существует несколько близких по смыслу и реализации методик, составляющих конкуренцию классическому процессу жакетирования. Тем не менее, как показывает статистика, именно жакетирование до сих пор лидирует на рынке производств, поскольку компании предпочитают иметь дело с наиболее отлаженной, универсальной, привычной и массовой технологией.

В основе всех этапов жакетирования лежит процесс тепломассопереноса, управление которым является сложной задачей в силу высокой требуемой точности выходных параметров изделия. Исследования и разработки в области математического моделирования жакетирования зачастую ограничиваются лишь полученными опытным путем технологическими рекомендациями [11–15] и сравнением результативности описанных выше технологий [16–20]. Вопросы управления процессом жакетирования, соответственно, являются ноу-хау производственных компаний, счет которым в мире идет на единицы. Таким образом,

имеется очевидный дефицит исследований, дающих математическое описание этапов жакетирования и тем более выработки управленческих решений в этой области.

В рамках данного исследования предлагается осуществить комплексный модельный описательный подход к вопросам управления тремя наиболее значимыми этапами полного процесса жакетирования – травление цилиндрической оболочки, ее полировка, схлопывание, а также масштабирование оболочки и стержня. Для описания основных механизмов обозначенных процессов предлагаются и реализуются двумерные и квазиодномерные математические модели, описываемые дифференциальными уравнениями в частных производных и системами обыкновенных дифференциальных уравнений. Основной целью моделирования является следующее: на основании расчётных данных моделей, описывающих все этапы жакетирования кварцевых заготовок, получить зависимости между основными параметрами описываемых процессов для осуществления быстрой количественной технологической корректировки ряда «подвижных», управляющих параметров. К примеру, на этапе травления связанная система «кварцевая трубка – подвижный нагреватель» имеет базовые настройки по скорости движения каретки газовой горелки и расходу газовой смеси для осуществления процесса нагрева в условиях протекания газа в полость трубки. Эти параметры задает технолог, они известны для идеального размера трубы (диаметр, толщина кварцевой стенки) и следуют из необходимости поддержания известных температурных режимов на внешней и внутренней стенках трубы. Однако фактически трубы имеют определенный разброс в геометрических характеристиках, меняется толщина, внешний диаметр или сразу оба значения. Задача технолога на этом этапе осуществить количественную корректировку расхода газа и скорости движения теплового источника для сохранения температурных режимов на поверхностях заготовки. Данное исследование нацелено на получение технологических номограмм для возможности осуществлять такие корректировки.

Такой подход позволяет не только судить об изучаемом процессе жакетирования в целом, но и о каждой его составляющей, выдавая рекомендации технологам о скрытых взаимосвязях, наблюдаемых в ходе реализации параметров.

1. Общая информация и принятые геометрические обозначения

Рассматриваются различные соотношения диаметров стержней и жакетных труб, а также толщин стенок жакетных труб. Возможные значения, наиболее употребительные в производственном процессе жакетирования (стандарт VSL-11), могут варьироваться в пределах, представленных в табл. 1.

Таблица 1

Соотношения диаметров стержней и жакетных труб,
а также толщин стенок жакетных труб

$D1 \cdot 10^3, \text{м}$	13,0						13,5						14,0					
$D3 \cdot 10^3, \text{м}$	25,0		35,0		45,0		25,0		35,0		45,0		25,0		35,0		45,0	
$\Delta \cdot 10^3, \text{м}$	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0
$D2 \cdot 10^3, \text{м}$	14,0	15,0	14,0	15,0	14,0	15,0	14,5	15,5	14,5	15,5	14,5	15,5	15,0	16,0	15,0	16,0	15,0	16,0
$H = \frac{(D3-D2)}{2} \cdot 10^3, \text{м}$	5,5	5,0	10,5	10,0	15,5	15,0	5,25	4,75	10,25	9,75	15,25	14,75	5,0	4,5	10,0	9,5	15,0	14,5

Здесь $D1$, $D2$, $D3$, h , Δ – геометрические характеристики кварцевых заготовок, соответствующие процессу «стержень в трубе» (рис. 2).

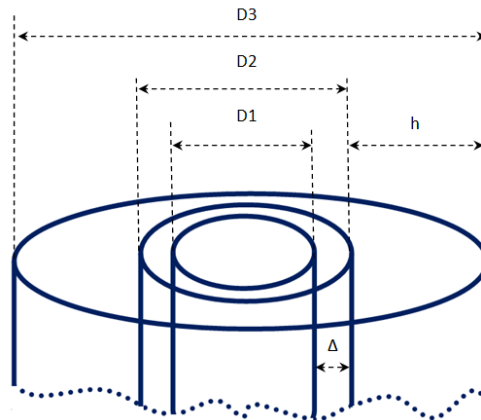


Рис. 2. Геометрические характеристики кварцевых заготовок «стержень в трубе»

2. Моделирование процесса жакетирования. Травление (очистка) труб

Первый этап процесса – травление жакетных заготовок. В процессе травления внутрь кварцевой жакетной трубы подается шестифтористая сера (элегаз), SF_6 – среда с высокой теплопроводностью.

Травление производится в течение однократного прохода горелки при достаточно высокой ее скорости перемещения, составляющей порядка 80 мм/мин. При температурах выше 1500 К элегаз разлагается на соединения серы и фтора, причем фтор, вступая в реакцию, образует плавиковую кислоту, с помощью которой происходит травление (очистка) внутренней поверхности. Зависимость расхода элегаза следует из постоянства концентрации фтора в слоях, прилегающих к внутренней стенке жакетной трубы, и представлена на рис. 3.

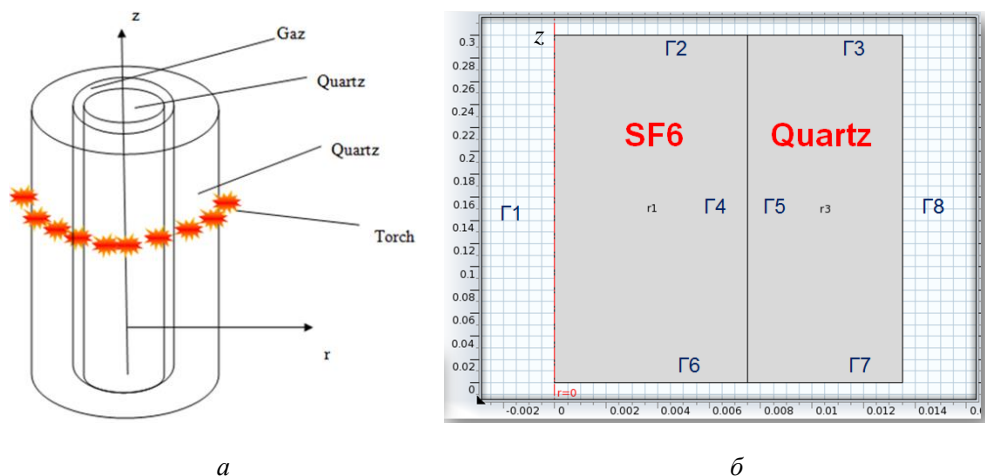


Рис. 3. Общая схема травления жакетной трубы (а); геометрия расчетной области (б)

Модель расчета процесса теплопереноса в ходе травления и ряда близких к этому процессов составляет двумерное осесимметричное уравнение теплопроводности в пространственных переменных r , z и времени t , общий вид которого имеет представление [21–24]:

$$\rho(T)C_p(T)\frac{\partial T(t,r,z)}{\partial t} - \nabla \cdot (k(T)\nabla T(t,r,z)) = Q(t,r,z), \quad (1)$$

где $T(t,r,z)$ – температура кварца; $k(T)$ – коэффициент теплопроводности кварца, $C_p(T)$ – теплоёмкость кварца при постоянном давлении, $\rho(T)$ – плотность кварца, $Q(t,r,z)$ – распределённый тепловой источник (при наличии такового). Предположение о постоянстве тепловых полей жакетной трубы в любом ее радиальном сечении следует из особенностей технологического процесса травления, в котором подвижный источник тепла имеет кольцевую форму, и его движение происходит вдоль боковой по-

верхности жакета. Это позволяет строить модель как двумерную осесимметрическую, в которой пространственная ось z направлена по оси симметрии, r – по радиусу трубы в ее произвольном осевом сечении, геометрия расчетной области представлена на рис. 2. Далее при упоминании функций, входящих в (1), запись их аргументов может упускаться.

Приведем характерные числовые значения процесса [21]: внутренний диаметр жакетной трубы $D_2 = 1,5 \cdot 10^{-2}$ м; толщина стенки жакетной трубы $h = 0,6 \cdot 10^{-2}$ м; температура горелки $T_{\text{torch}} = 2023$ К; скорость горелки $v = 80$ мм/мин; расход SF_6 $Q_g = 1$ slm (standard litre per minute); длина жакетной трубы $L = 0,3$ м (длина зоны нагрева). Здесь граница $r = 0$ – ось симметрии, переменные $z \in [0; L]$, $r \in \left[0; \frac{D_2}{2} + h\right]$.

Граничные условия на внешних и внутренних частях границы Г1-Г8 (рис. 3) определены следующим образом. Г1: ось симметрии, Г2, Г3, Г6, Г7: $n \cdot (k \nabla T) = 0$ (условие тепловой изоляции), Г4, Г5: $n \cdot (k_1 \nabla T - k_2 \nabla T) = 0$ (условие разделения двух сред твердое тело – газ), Г8: $n \cdot (k \nabla T) = h \cdot (T_{\text{inf}} - T)$ (теплообмен с окружающей средой по закону Ньютона), Г4, Г5, Г7, Г8: $n \cdot (k \nabla T) = C \cdot (T_{\text{amb}}^4 - T^4)$ (лучистый теплообмен); Г8: $n \cdot (k \nabla T) = q(t, z)$ (нагрев подвижным тепловым источником – горелкой) [21]. Задание на некоторых частях границы различных условий означает фактическое суммирование соответствующих частей равенств, их определяющих. Так, например, на боковой поверхности цилиндра заданы как условие теплообмена, учитывающее подведение внешнего источника тепла горелкой, также отведение тепла посредством излучения, а также теплообмен с окружающей средой по закону Ньютона. Значение коэффициента теплопроводности k выбирается в зависимости от среды (кварц / газ).

Начальные условия, дополняющие (1), определены температурами газа и кварца в соответствующих областях:

$$T_{t=0} = \begin{cases} T_r, r \in [0; D_2 / 2) \\ T_{\text{кв}}, r \in [D_2 / 2; D_2 / 2 + h] \end{cases}, T_{\text{кв}} = 300 \text{ К}, T_r = 300 \text{ К}.$$

Значения $T_{\text{amb}} = T_{\text{inf}} = 300$, $h = 50$ являются референсными для расчетов такого типа, $C = \sigma_0 \varepsilon$ – коэффициент излучения кварца, соответствующий произведению постоянной Стефана-Больцмана

$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) на степень черноты кварца 0,93. Функция $q(t, z)$, задаваемая на границе Г8, определяет мощность теплового источника (горелки) и является функцией времени t и переменной z . Ее вид подчинен закону Гаусса: $q(t, z) = q_{\max} \cdot \exp(-A(Bt + z - L)^2)$, где q_{\max} , A , B – положительные постоянные, значения которых определяют пиковую мощность источника, его скорость и форму (ширину) факела горелки соответственно [21].

Численная реализация расчета тепловой задачи осуществлялась методом конечных элементов в САПР – системе мультифизического моделирования Comsol Multiphysics, наиболее эффективной для решения задач из области теплопереноса и отличающейся возможностью моделировать сопряженные (мультифизические) задачи. Возможности пакета позволяют объединять и моделировать взаимодействие разных физических явлений и сред в одной системе, в нашем случае это взаимодействие сред кварц/газ. Так, были использованы теплофизические характеристики оксида кремния и его расплава (SiO₂, fused quartz), а также элегаза SF₆, заложенные в библиотеку материалов Comsol Material Library. Особенности в задании коэффициента теплопроводности $k(T)$ будут обсуждены ниже по тексту. Также отметим, что на данном этапе скоростью протекания газовой среды было решено пренебречь, поскольку на практике его движение и связанная с ним конвективная передача тепла не вносят большого вклада в общий расчет температурных характеристик системы. Результатами численного моделирования являются температурные поля в 2D и восстановленных по 2D-образам 3D-областях (рис. 4).

Важными в технологическом моменте в процессе травления жакетной заготовки являются процессы обеспечения и поддержания необходимой температуры на внутренней стенке трубы. Исследование по данной модели дает возможность рассчитать температуры на стенках в зависимости от выбранных режимов движения горелки и ее мощности.

На рис. 5 представлены графики зависимости температуры кварца по длине трубы при нескольких фиксированных значениях радиуса r в момент времени, обусловленный прохождением горелки в окрестности середины заготовки ($z \sim L/2$). Здесь синий и черный цвета – это температурные профили для внешней и внутренней стенок трубы соответственно. Заметна достаточная разница температур, она составляет

порядка 400 К. Также показано, что на внутренней стенке жакетной трубы, границе раздела сред кварц/элегаз, происходит качественное изменение характера температурного поля.

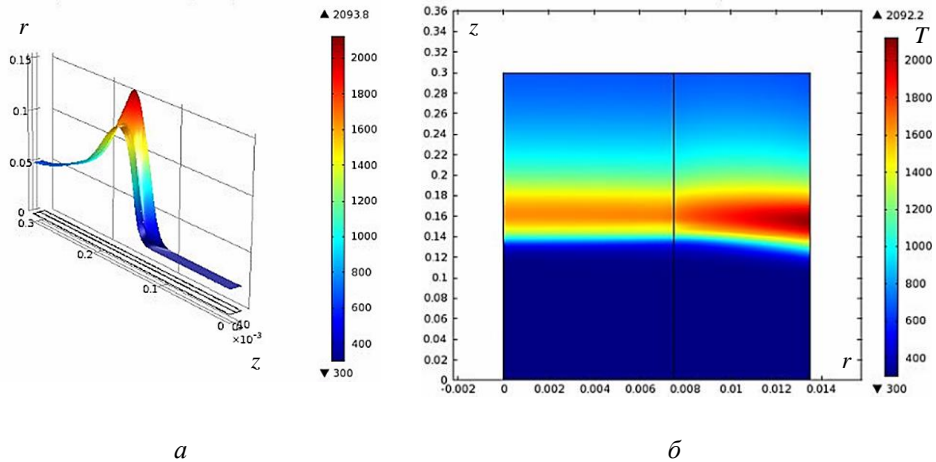


Рис. 4. Температурные поля жакетной трубы по длине заготовки (а), в осевом сечении (б)

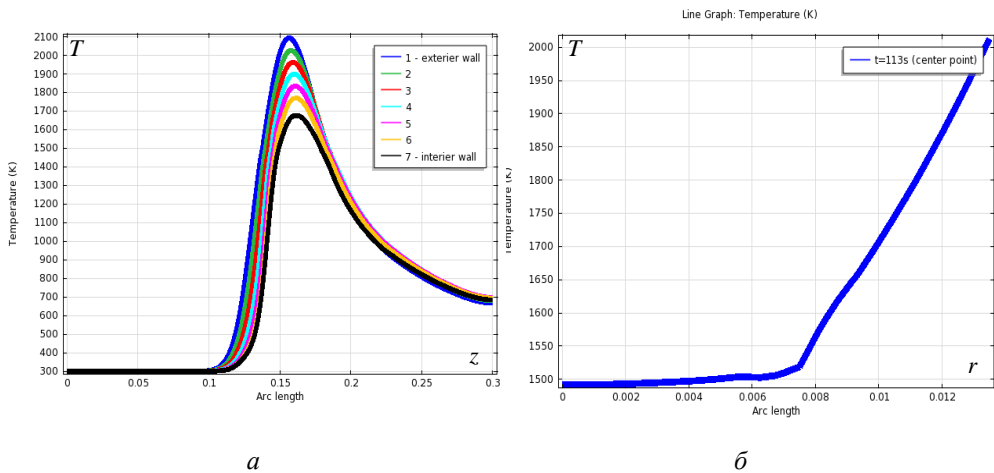


Рис. 5. Распределение температуры в кварце по длине заготовки, $t=113$ с, черный цвет – внутренняя поверхность трубы, синий – внешняя поверхность (а); распределение температуры в кварце и газе по радиусу, $t=113$ с, $z=L/2$ (б)

Решение прямой тепловой задачи позволило рассчитать зависимости некоторых параметров процесса травления и на их основании построить номограммы связи таких показателей, как скорость горелки и толщина стенки жакетной трубы от внутреннего диаметра жакетной

трубы (рис. 6). Связь указанных параметров определена из соображений поддержания температуры 1700 К на внутренней стенке жакетной трубы, что соответствует нормальному течению процесса травления.

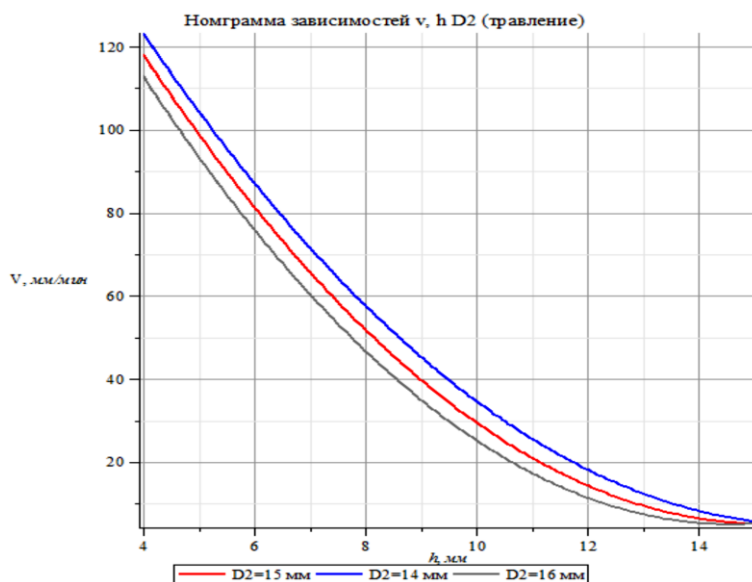


Рис. 6. Номограмма зависимостей скорости (v , мм/мин), внутреннего диаметра жакетной трубы (D_2 , мм) и толщины стенки жакетной трубы (h , мм)

Отметим, что особое внимание следует уделять вариантам геометрии, соответствующим толстостенным жакетным заготовкам. При значениях толщины жакетной трубы $h > 12$ мм на внутренней стенке жакетной трубы температура 1700 К не может быть достигнута даже при технологически минимально возможной скорости движения горелки. В этом случае необходимой мерой является увеличение мощности горелки.

3. Моделирование процесса жакетирования.

Полировка жакетных заготовок

Полировка жакетных труб заключается в особом режиме температурного воздействия на трубу, при котором осуществляются три прямых и два возвратных прохода горелки вдоль жакетной трубы в режиме контакта сред кварц/воздух. При этом скорости движения теплового источника в каждом следующем прямом ходе уменьшаются (табл. 2).

Таблица 2

Регламентированные значения параметров этапа полировки

Параметр	1-й ход	2-й ход	3-й ход
Температура на внешней поверхности жакетной трубы от контакта с факелом горелки, К	2153	2263	2183
Температура на внутренней поверхности жакетной трубы, К	1750	1750	1750
Скорость прямого движения горелки, мм/мин (один из возможных вариантов)	30	25	20
Скорость возвратного движения горелки, мм/мин	500	500	—

Основной задачей данного этапа является подбор скорости и мощности горелки для обеспечения поддержания необходимого уровня температур на поверхностях кварца, при которых происходит полирование поверхности. Проведена серия расчетов прямой задачи теплопроводности (1) для комбинации сред кварц/воздух, для каждого из проходов горелки были рассчитаны температурные профили в кварце и на его поверхностях, определены законы, согласно которым мощность подвижного теплового источника представляется в форме функций продольной координаты z и времени t . Итак, общий закон, определяющий скорость и мощность источника тепла, имеет вид: $q(t, z) = q_{\max} \cdot \exp(-A(Bt + \theta z - \phi L)^2)$ [21], где $q_{\max} = 2 \cdot 10^6$, $A = 2500$, $L = 0,3$. Для первого прямого прохода горелки имеем: $B = 5 \cdot 10^{-4}$, $\theta = 1$, $\phi = 1$, $t \in [0; 600]$ (процесс занимает 600 с). Для обратного хода горелки после первого прохода $B = 8,33 \cdot 10^{-3}$, $\theta = -1$, $\phi = 0$, $t \in [600; 636]$ (процесс занимает 36 с). Для второго прямого прохода горелки: $B = 4,17 \cdot 10^{-4}$, $\theta = 1$, $\phi = 1$, $t \in [636; 1386]$ (процесс длится 750 с). Для обратного хода горелки после второго прохода $B = 8,33 \cdot 10^{-3}$, $\theta = -1$, $\phi = 0$, $t \in [636; 672]$ (процесс длится 36 с). Для третьего прямого прохода горелки: $B = 3,33 \cdot 10^{-4}$, $\theta = 1$, $\phi = 1$, $t \in [672; 1572]$ (процесс длится 900 с).

На рис. 7 показаны температурные профили в кварце по длине цилиндра и температурная зависимость по радиальной координате в средах кварц/воздух.

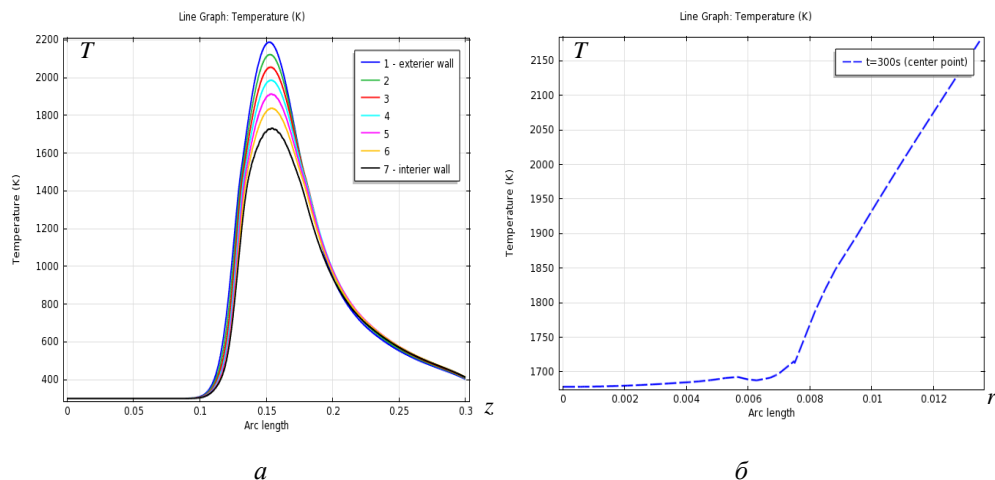


Рис. 7. Первый прямой ход горелки: распределение температуры в кварце по длине заготовки, $t = 300$ с, черный цвет – внутренняя поверхность трубы, синий – внешняя поверхность (а); распределение температуры в кварце и воздухе по радиусу, $t = 300$ с, $z = L/2$ (б)

Технологические номограммы зависимостей скорости горелки v , мм/мин, внутреннего диаметра жакетной трубы D_2 , мм, и толщины стенки жакетной трубы h , мм, получены для всех трех прямых ходов горелки и представлены на рис. 8. Таким образом, можно говорить о возможных комбинациях геометрических размеров и скорости движения факела, при которых выдержаны необходимые температурные режимы, а значит, полировка возможна.

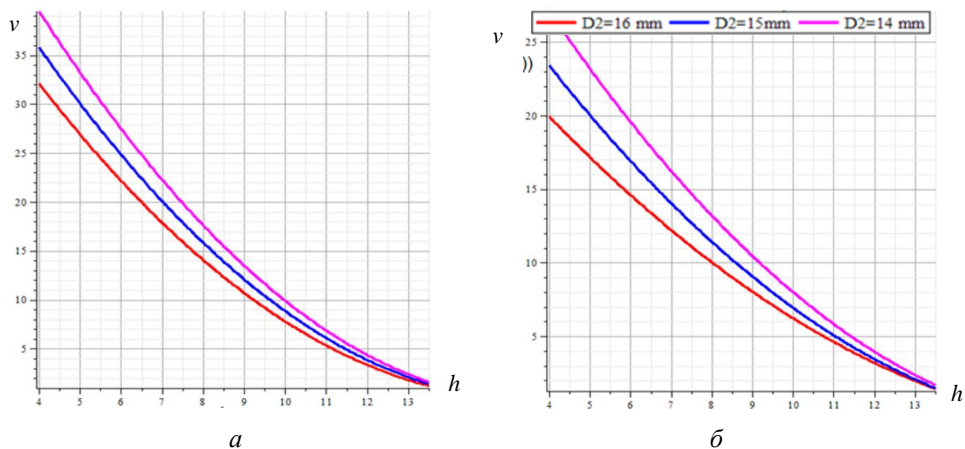


Рис. 8. Номограммы связи v (мм/мин), h (мм), D_2 (мм) для второго (а) и третьего (б) ходов горелки в процессе полировки

4. Схлопывание и масштабирование стержня и жакетной трубы

Схлопывание и масштабирование – это третий этап процесса жакетирования, модельное описание которого вновь опирается на уравнение теплопроводности (1). В условиях осесимметричности геометрия области диаметрального сечения труб, вставленных друг в друга при условии постоянства ширины воздушного зазора между внешней поверхностью сердечника и внутренней поверхностью цилиндрической оболочки, представлена на рис. 9, а. Источник тепла – подвижная круговая горелка, подводит тепло к боковой поверхности заготовки и, перемещаясь по ее длине, обеспечит дальнейшее схлопывание кварцевых поверхностей при условии достижения и поддержания заданной температуры порядка 1860 К на внутренней поверхности оболочки.

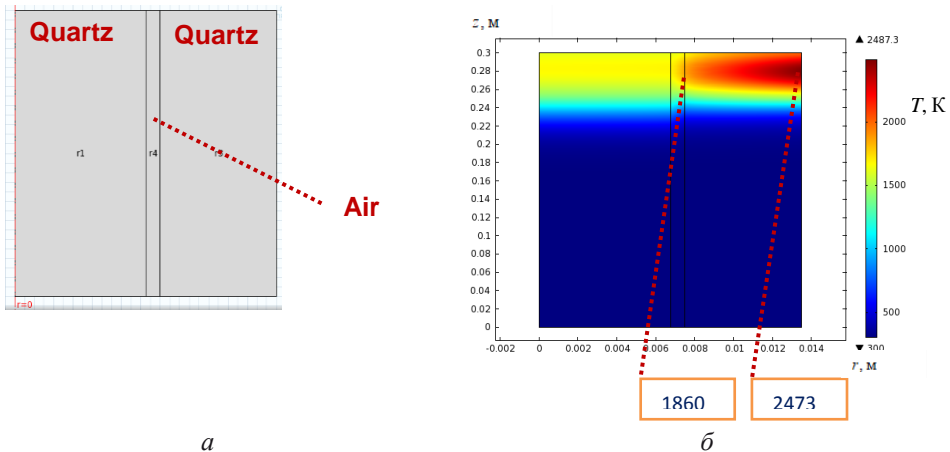


Рис. 9. Схема геометрии расчетной области процесса схлопывания оболочки и сердечника (а) и температурные поля процесса (б)

Результаты тестового расчета температурного распределения при решении тепловой задачи с подвижным тепловым источником представлены на рис. 9, б. Адаптация значений мощности и скорости горелки (функции $q(t, z)$ на границе Г8) проводилась из соображений поддержания температуры на внешней стенке оболочки во время ее контакта с горелкой в диапазоне (2450; 2500 К), а на внутренней – (1850; 1870 К). На рис. 10 представлен вариант моделирования для расстояния воздушного зазора $\Delta = 0,75$ мм, геометрические характеристики

кварцевого цилиндра те же, что и в расчетах, описанных выше. Для иных вариантов величин зазоров и геометрии заготовок на основании полученных расчетов решения тестовой задачи рассчитаны технологические номограммы зависимостей толщины жакетной трубы (h , м) и мощности горелки (q_{\max} , $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) от расстояния зазора между стержнем и жакетной трубой (Δ , мм). Результаты численного моделирования представлены на рис. 10.

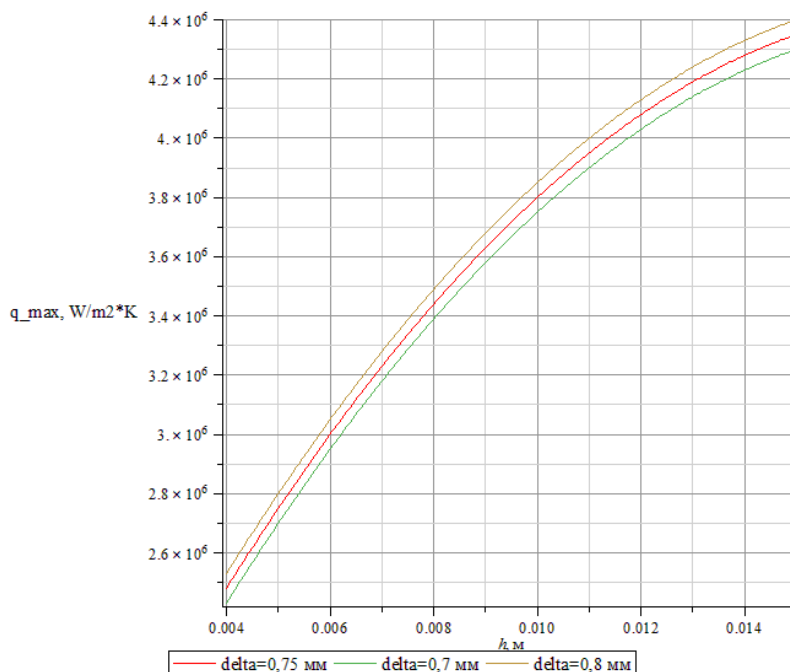


Рис. 10. Номограмма зависимостей толщины жакетной трубы (h , м) и мощности горелки (q_{\max} , $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) от расстояния между стержнем и жакетной трубой (Δ , мм)

Завершающий этап процесса жакетирования – масштабирование или посадка жакетной трубы на стержень – сложен и потому интересен в смысле моделирования, поскольку на этом этапе под температурными нагрузками происходит фактическое изменение исходных геометрических размеров кварцевых труб. Этот этап является целевым и поэтому представляет наибольший интерес для изучения и моделирования. Для исследования процесса жакетирования использована квазиодномерная модель вытяжки кварцевых трубок. При построении модели особое внимание уделяется процессам теплообмена, которые играют

первостепенную роль. Вследствие этого в модели были учтены все виды теплообмена: молекулярный (теплопроводность), конвективный и лучистый. Технологическая схема рассматриваемого процесса изображена на рис. 11.

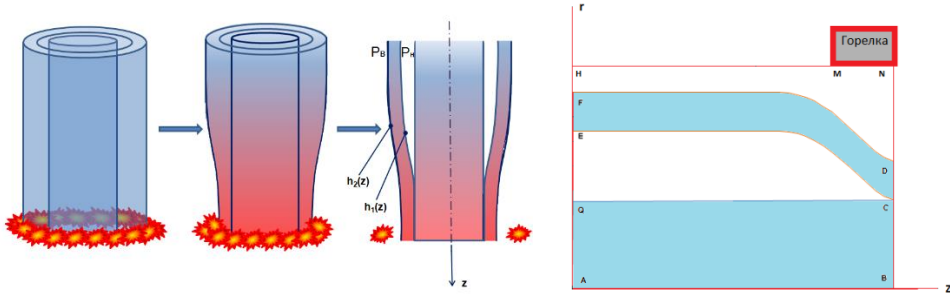


Рис. 11. Технологическая схема процесса жакетирования кварцевой трубы: исходное положение; посадка жакетной трубы на оболочку; изучаемое диаметральное сечение; двумерная область решения задачи

Исходная задача является осесимметричной, и отношение характерного размера $|\overline{EF}|$ к длине $|\overline{AB}| = L$ много меньше единицы. В этом случае из асимптотического анализа уравнений Навье–Стокса [21] получаем следующую систему дифференциальных уравнений относительно функций внутреннего и внешнего радиусов заготовок: $h_1 = \frac{D1}{2}$

и $h_2 = \frac{D2}{2} + h$ соответственно, скорости подачи заготовок в сборке относительно неподвижной горелки (или самой горелки относительно неподвижной системы заготовок) v и температуры T кварца в исследуемой области. В рамках квазиодномерной модели вытяжки кварцевых трубок (в силу описанных выше особенностей геометрии процесса пренебрегая изменениями вдоль радиальной координаты и учитывая лишь изменения по продольной координате z) основные уравнения, описывающие процесс, а также начальные и граничные условия к ним имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} (v(z) \cdot \frac{d}{dz} v(z) - g) \cdot \rho \cdot (h_2(z)^2 - h_1(z)^2) = \frac{d}{dz} (3\mu \cdot (h_2(z)^2 - \\ - h_1(z)^2) \cdot \frac{d}{dz} v(z) + \gamma \cdot (h_1(z) + h_2(z))), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{d}{dz}(h_1(z)^2 v(z)) &= \frac{p_0 \cdot h_1(z)^2 \cdot h_2(z)^2 - \gamma \cdot h_1(z) \cdot h_2(z) \cdot (h_1(z) + h_2(z))}{\mu \cdot (h_2(z)^2 - h_1(z)^2)}, \\
 \frac{d}{dz}(h_2(z)^2 v(z)) &= \frac{p_0 \cdot h_1(z)^2 \cdot h_2(z)^2 - \gamma \cdot h_1(z) \cdot h_2(z) \cdot (h_1(z) + h_2(z))}{\mu \cdot (h_2(z)^2 - h_1(z)^2)}, \quad (2) \\
 (h_2(z)^2 - h_1(z)^2) \cdot \rho \cdot Cp \cdot v(z) \cdot \frac{d}{dz}T(z) &= \frac{d}{dz}(k(h_2(z)^2 - h_1(z)^2) \cdot \frac{d}{dz}T(z)) - \\
 - 2h_2(z) \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dz}h_2(z)\right)^2} \cdot (\omega \cdot \varepsilon \cdot n_c^2 \cdot \sigma \cdot (T(z)^4 - T_a^4) - q(z) + \alpha_2 \cdot (T(z) - T_a)) - \\
 - 2h_1(z) \sqrt{1 + \left(\frac{d}{dz}h_1(z)\right)^2} \cdot \alpha_1 \cdot (T(z) - T_h), \\
 v(0) = v_0, \frac{d}{dz}v(L) = 0, h_1(0) = h_{1_0}, h_2(0) = h_{2_0}, \\
 T(0) = T_0, \frac{d}{dz}T(L) = 0. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Значения параметров, входящих в систему, а также некоторые их зависимости заданы следующим образом: $g = -9,8$, $\gamma = 0,3$, $\rho = 2200$, $p_0 = \{0, -5000, \dots, -40000\}$, $L = 0,5$, $H = 0,02$, $\omega = 1$, $\varepsilon = 0,93$, $n_c = 1$, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$, $T_a = 300$, $\alpha_1 = 70$, $\alpha_2 = 30$, $T_h = 1000$, $v_0 \in [0; 0,004]$, $h_{2_0} \in [0,015; 0,045]$, $h_{1_0} = 0,0075$, $T_0 = 1200$, $q_{\max} = 0,959 \cdot 10^6$, $\mu_0 = 10^{4,5}$, $k_0 = 0,001038$, $q = q_{\max} \cdot \exp\left(-\left(L/2 - z\right)^2 / H^2\right)$, $\mu = \mu_0 \cdot 10^{5,5(\exp(2273-T(z))-1)}$ [21, 22]. В уравнениях (2) учтен молекулярный теплообмен, теплообмен по закону Ньютона с внутренней и наружной стороны трубки, излучение в окружающую среду с внешней стороны трубки и энергия, получаемая от горелки. Краевые условия (3) определяют так называемое обращенное движение, то есть движение в предположении, что горелка неподвижна, а трубка движется со скоростью, равной скорости движения горелки в реальном процессе. Аналитическое представление вязкости, принятое выше, является одной из модификаций закона Пойса (Poise law) [23, 24], позволяющей получить описание вязкости расплава кварца в достаточно широком диапазоне температур. Для сравнения, зависимость $\mu(T)$ библио-

теки материалов Comsol Multiphysics ограничивается диапазоном от 1440 до 2263 К и представляется зависимостью:

$$\mu(T) = \exp(-1.110292\text{E-}08 \cdot T^3 + 7.753523\text{E-}05 \cdot T^2 - 1.953707\text{E-}01 \cdot T + 1.852354\text{E+}02) \quad [21,22].$$

При выборе значений теплопроводности кварца k и его удельной теплоемкости C_p учитывались их представления в форме интерполяции кусочными полиномиальными зависимостями от температуры T (см. рис. 12), предложенные в библиотеке материалов Comsol Multiphysics.

Однако, как следует из представленных таблиц и рисунков, данные тепловые характеристики расплава кварца (“fused quartz” в Comsol) ограничиваются в своих представлениях температурными диапазонами, при которых кварц ведет себя, как твердое тело. Вопрос исследования и описания этих и иных характеристик материала при более высоких температурах, когда агрегатное состояние вещества меняется, представляет наибольшую сложность. Так, что касается теплоемкости, с увеличением температуры свыше 925 К интерполяционный многочлен третьей степени имеет слабо выраженную нелинейность, что позволяет считать данную характеристику подчиняющейся почти линейной зависимости. В области температур, превышающих 2000 К, Material Browser Comsol для материала “fused quartz” типа “liquid” назначает теплоемкости кварца постоянное значение 1426.58375 Дж/кг*К. В данном исследовании при проведении расчетов учтены все эти представления. Описание теплопроводности расплава кварца в этом же источнике дается в диапазоне температур лишь до 1500 К, однако, как показано Хомси и Волкером [25], а также Парком и Ранком [26], при большем нагреве влияние излучения в кремниевом стержне весьма существенно и описывается диффузионным приближением Росселанда [27]:

$$k = k_{cond} + k_{rad} = k_{cond} + \frac{16n_c^2 \sigma T^3}{3\hat{\alpha}},$$

где для коэффициента поглощения n_c и показателя преломления $\hat{\alpha}$ берутся значения 4 и 1,5 соответственно [25–27].

Численное исследование системы (2), (3) проведено для различных вариантов геометрических характеристик системы «стержень в трубке» в полной сборке (см. рис. 2). Внутренний диаметр стержня ($D1$) принят

равным 13,5 мм. Внутренний диаметр жакетной трубы (D_2) – 15 или 15,5 мм. Значения толщины стенки варьировались $h = \{4, 5, \dots, 10\}$ мм. Величины зазоров между стенками Δ принимались равными 0,75 или 1 мм.

Результатами численного исследования явились профили распределения внешнего и внутреннего диаметров стержня и жакетной трубы, температур и скоростей, характерные виды которых представлены на рис. 12.

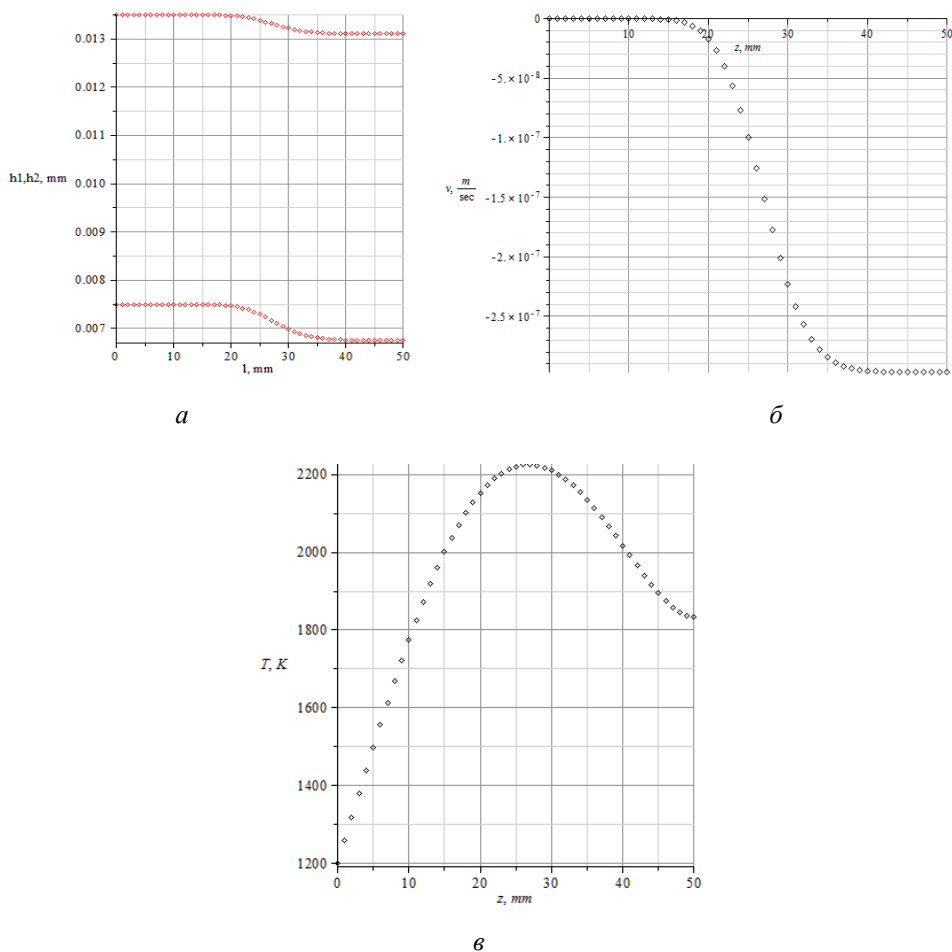


Рис. 12. Значение радиусов схлопываемых поверхностей (а), скорости движения частиц при обращенном движении (б), температуры (в)

Следующим этапом исследования явилось построение технологических номограмм для определения зависимостей технологических параметров, оказывающих непосредственное влияние на систему и процесс жакетирования в целом.

Зависимости расхода газовой смеси от толщины жакетной трубы получены при решении краевой задачи (2), (3) при условии нулевой разности давлений внутри и снаружи системы при различных величинах зазора между трубой и жакетом. Получены номограммы, иллюстрирующие данную зависимость для значений величины зазора от 0,75 до 1,0 мм (рис. 13).

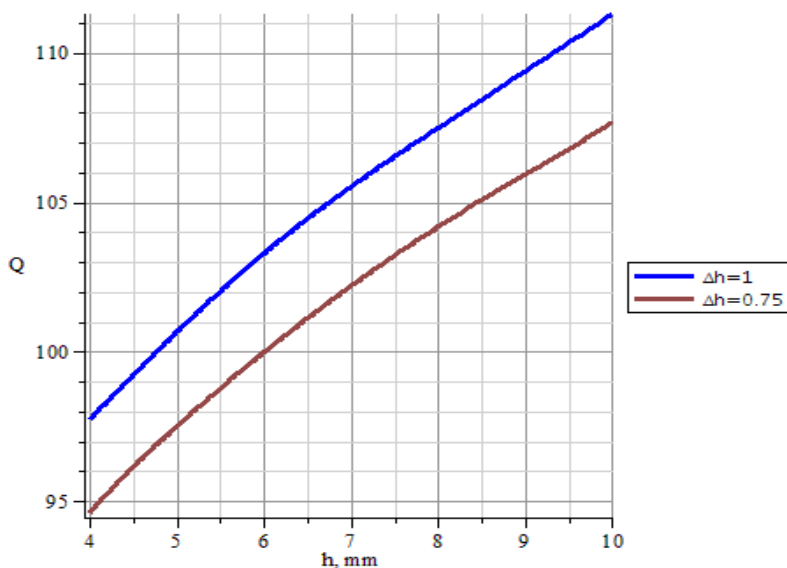


Рис. 13. Зависимости расхода газовой смеси от толщины жакетной трубы h и величины воздушного зазора Δ

Также из решений (2), (3) получены взаимосвязи между скоростью движения горелки v , величиной h толщины жакетной трубы и расходом газовой смеси Q для различных величин разности давлений снаружи и внутри системы $\Delta p = p_v - p_n$. Полученные результаты также представлены в виде управляющих технологических номограмм технолога, осуществляющего процесс жакетирования. Рассчитаны типичные для производственного процесса варианты, актуальные для принятия решений технологом, на рис. 14 представлен один из них.

Технологический режим: $\Delta = 0,75$ мм, $Q = 100$ или $Q = 110$.

Расчет для серии иных комбинаций значений параметров процесса позволил получить результаты зависимостей, связывающих такие параметры, как толщина жакетной трубы, скорость и перепад давления внутри и снаружи жакетной трубы (рис. 15).

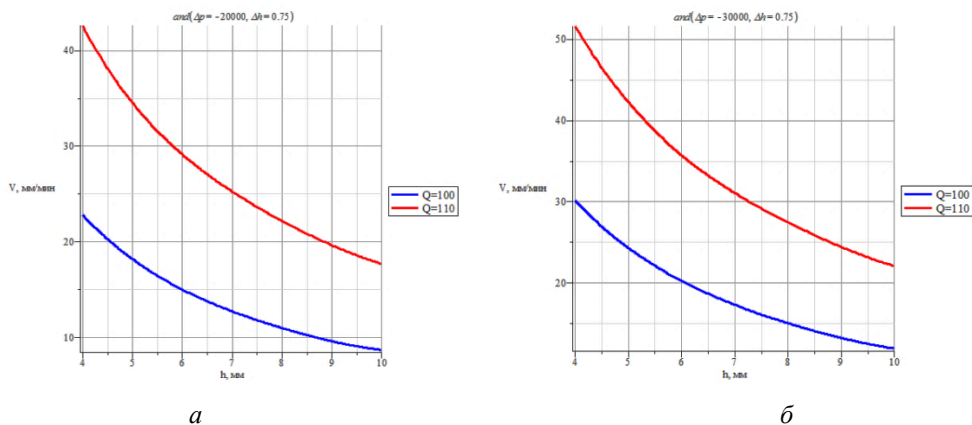


Рис. 14. Зависимость скорости от толщины жакетной трубы и расхода газовой смеси при величине зазора $\Delta = 0,75$: $\Delta p = -20000$ (а), $\Delta p = -30000$ (б)

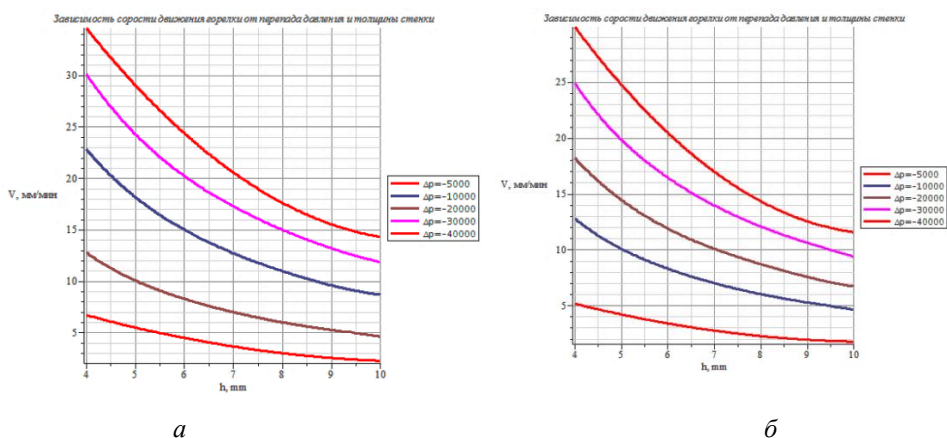


Рис. 15. Зависимости скорости от толщины жакетной трубы и разницы внешнего и внутреннего давления в системе, $\Delta = 0,75$ мм (а), $\Delta = 1$ мм (б)

Представленные номограммы являются важными для управления процессом, поскольку дают связь скорости горелки v от толщины жакетной трубы h и разницы давления в широком коридоре используемых на практике значений, продемонстрированы два варианта расчета для разных величин воздушного зазора между сердцевинной и оболочкой в исходной сборке системы труб.

Заключение

В работе рассмотрен полный цикл процесса жакетирования кварцевых заготовок с позиций выработки управленческих решений технолога. В основу исследования положены математические модели тепло-

массопереноса, адаптированные для случая, когда тепловой источник подвижен, его скорость – управляемый параметр, геометрия жакетной трубы и сердечника также варьируется в заданном диапазоне значений. Также учтен перепад давления внутри и снаружи сборки для обеспечения завершающего этапа – схлопывания и масштабирования. Получены новые результаты связи обозначенных выше технологических параметров, позволяющие быстро и качественно вырабатывать технологические решения. Так, для всех этапов жакетирования управляющие технологические решения представлены номограммным методом – в форме взаимных зависимостей ключевых параметров процесса, в том числе управляющих. Такой номограммный подход оптимален для изучаемого процесса, как и для подобных изучаемому, к примеру, процессов легирования кварцевых заготовок [21], вытяжки оптического волокна [22–24] и др. в первую очередь за счет удобства применения номограмм при проведении быстрой ручной корректировки настроек станка технологом. Для первого этапа, травления заготовок, получена номограммная связь зависимостей скорости горелки v , внутреннего диаметра жакетной трубы D_2 и толщины стенки жакетной трубы h . Для второго этапа полировки также получены номограммы связи v , h , D_2 для всех трех проходов горелки. Для третьего этапа, схлопывания и масштабирования системы труб в сборке, номограммным методом показана связь скорости v от толщины жакетной трубы h и от величины воздушного зазора Δ . Также показана связь скорости v от толщины жакетной трубы h и расхода газовой смеси Q , скорости v от толщины жакетной трубы h и величины перепада внешнего и внутреннего давления Δp . Показан пример расчёта на реальных данных производственного предприятия для величины зазора между жакетом и сердечником $\Delta = 0,75$.

Библиографический список

1. Иванов, Г.А. Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон: учеб. пособие / Г.А. Иванов, В.П. Первадчук. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 171 с.
2. A comprehensive review of optical fiber technologies in optogenetics and their prospective developments in future clinical therapies / S. Chen, Z. Wang, K. Xiao, B. He, J. Zhao, X. Yang, Q. Liu, A.K. Sharma, A.L. Jun-

ior, R. Min // *Optics & Laser Technology*. – 2024. – Vol. 179. – P. 111332. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.111332

3. Leal-Junior, A. Chapter 4 – Optical fiber fundamentals and overview. *Optical Fiber Sensors for the Next Generation of Rehabilitation Robotics* / ed. A. Leal-Junior, A. Frizera-Neto. – Academic Press. – 2022. – P. 67–91. DOI: 10.1016/B978-0-32-385952-3.00013-5

4. Bortsov, A. Method of manufacturing workpieces for opticaing on nitrogen-doped quartz glass / A. Bortsov, V.E. Karasik. – 2013. DOI: 10.13140/RG.2.2.29191.01445

5. Advanced processing techniques and impurity management for high-purity quartz in diverse industrial applications / H. Long, D. Zhu, J. Pan, S. Li, C. Yang, Z. Guo // *Minerals*. – 2024. – Vol. 14, № 6. – P. 571. DOI: 10.3390/min14060571

6. Applications and development of multi-core optical fibers / W. Chen, L. Yuan, B. Zhang, Q. Yu, Z. Lian, Y. Pi, C. Shan, P. Shum // *Photonics*. – 2024. – Vol. 11, № 3. – P. 270. DOI: 10.3390/photonics11030270

7. Material and technology trends in fiber optics / K. Schuster, S. Unger, C. Aichele, F. Lindner, S. Grimm, D. Litzkendorf, J. Kobelke, J. Bierlich, K. Wondraczek, H. Bartelt // *Advanced Optical Technologies*. – 2014. – Vol. 3, № 4. – P. 447–468. DOI: 10.1515/aot-2014-0010

8. Highly efficient Yb-doped silica fibers prepared by powder sinter technology / M. Leich, F. Just, A. Langner, M. Such, G. Schötz, T. Eschrich, S. Grimm // *Optics Letters*. – 2011. – Vol. 36, № 9. – P. 1557–1559.

9. Borzycki, K. Hollow-core optical fibers for telecommunications and data transmission / K. Borzycki, T. Osuch // *Applied Sciences*. – 2023. – Vol. 13, № 19. – P. 10699. DOI: 10.3390/app131910699

10. Fabrication of tubular anti-resonant hollow core fibers: modelling, draw dynamics and process optimization / G.T. Jasion, J.R. Hayes, N.V. Wheeler, Y. Chen, T.D. Bradley, D.J. Richardson, F. Poletti // *Opt. Express*. – 2019. – Vol. 27. – P. 20567–20582.

11. Extruded tellurite antiresonant hollow core fiber for Mid-IR operation / A. Ventura, J. Hayashi, J. Cimek, G. Jasion, P. Janicek, F. Slimen, N. White, Q. Fu, L. Xu, H. Sakr [et al.] // *Opt. Express*. – 2020. – Vol. 28. – P. 16542–16553.

12. Bogatyrev, V.A. Chapter 15 - Metal-coated fibers. *Specialty Optical Fibers Handbook* / ed. A. Méndez, T.F. Morse. – Academic Press, 2007. – P. 491–512.

13. Schmid, S.R. Chapter 4 - Optical fiber coatings. Specialty Optical Fibers Handbook / ed. A. Méndez, T.F. Morse. – Academic Press, 2007. – P. 95–122.
14. Paek, U.C. Determination of the viscosity of high silica glasses during fibre drawing / U.C. Paek, C.M. Schroeder, C.R. Kurkjian // Glass Technology. – 1988. – Vol. 29, № 6. – P. 263–266.
15. Kirchhof, J. Chapter 14 - Photonic crystal fibers. Photonic Crystals: Advances in Design, Fabrication, and Characterization / ed. K. Busch, S. Lölkes, R.B. Wehrspohn, H. Föll. – John Wiley & Sons, 2004. – P. 266–288.
16. Study of lanthanum aluminum silicate glasses for passive and active optical fibers / D. Litzkendorf, S. Grimm, K. Schuster, J. Kobelke, A. Schwuchow [et al.] // International Journal of Applied Glass Science. – 2012. – Vol. 3, № 4. – P. 321–331.
17. Granulated silica method for the fiber preform production / S. Pilz, H. Najafi, M. Ryser, V. Romano // Fibers. – 2017. – Vol. 5, № 3. – P. 24. DOI: 10.3390/fib5030024
18. Progress in the fabrication of optical fibers by the sol-gel-based granulated silica method / S. Pilz, H. Najafi, A. El Sayed, J. Boas [et al.] // Proceedings of SPIE Photonics Europe, Brussels, Belgium. – 2016.
19. Extra-high pressure in the core of silica-based optical fiber preforms during the manufacturing process / G. Bufetova, A. Kosolapov, M. Yashkov [et al.] // Photonics. – 2023. – Vol. 10, № 3. – P. 335. DOI: 10.3390/photonics10030335
20. Mysen, B. Chapter 5 – Silica. Silicate Glasses and Melts. Ed. B. Mysen, P. Richet. – Elsevier Science, 2019. – P. 147–163.
21. Первадчук, В.П. Оптимальное управление тепловым источником воздействия в процессах парофазного осаждения / В.П. Первадчук, Д.Б. Владимирова, Д.Н. Дектярев // Проблемы управления. – 2020. – № 6. – С. 71–80.
22. Pervadchuk, V.P. Manufacturing quartz hollow fibers: solution to the problem of stability in the drawing of capillaries instruments and experimental techniques / V.P. Pervadchuk, D.B. Vladimirova, A.L. Derevyankina // Instruments and Experimental Techniques. – 2023. – Vol. 66, № 5. – P. 881–890.
23. Fabrication of silica optical fibers: optimal control problem solution / V. Pervadchuk, D. Vladimirova, I. Gordeeva, A.G. Kuchumov, D. Dektyarev // Fibers. – 2021. – Vol. 9, № 12. – P. 77. DOI: 10.3390/fib9120077

24. Vladimirova, D. Manufacture of microstructured optical fibers: problem of optimal control of silica capillary drawing process / D. Vladimirova, V. Pervadchuk, Y. Konstantinov // *Computation*. – 2024. – Vol. 12, № 5. – P. 86. DOI: 10.3390/computation12050086

25. Walker, K.L. Thermophoresis deposition of small particles in the modified chemical vapor deposition (MCVD) process / K.L. Walker, F.T. Geyling, S.R. Nagel // *Journal of the American Ceramic Society*. – 1980. – Vol. 63, № 9-10. – P. 552–558.

26. Park, K.S. Conjugate heat transfer and particle deposition process: effect of torch speed and solid layer / K.S. Park, M. Choi // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 1994. – Vol. 37, № 11. – P. 1593–1603.

27. Park, K.S. Unsteady heat and mass transfer on the codeposition of SiO₂/GeO₂ during the modified chemical vapor deposition process / K.S. Park, M. Choi, J.D. Chung // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2000. – Vol. 43, № 17. – P. 3209–3217. DOI: 10.1016/S0017-9310(99)00352-X

References

1. Ivanov G.A., Pervadchuk V.P. Tekhnologiya proizvodstva i svoystva kvartsevykh opticheskikh volokon [Technology of production and properties of quartz optical fibers]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2011, 171 p.

2. Chen S., Wang Z., Xiao K., He B., Zhao J., Yang X., Liu Q., Sharma A.K., Junior A.L., Min R. A comprehensive review of optical fiber technologies in optogenetics and their prospective developments in future clinical therapies. *Optics & Laser Technology*, 2024, vol. 179, 111332 p. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.111332

3. Leal-Junior A. Frizera-Neto A. Chapter 4 - Optical fiber fundamentals and overview. *Optical Fiber Sensors for the Next Generation of Rehabilitation Robotics*. Ed. A. Leal-Junior, A. Frizera-Neto. Academic Press, 2022, pp. 67-91. DOI: 10.1016/B978-0-32-385952-3.00013-5

4. Bortsov A., Karasik V.E. Method of manufacturing workpieces for optocasing on nitrogen-doped quartz glass, 2013. DOI: 10.13140/RG.2.2.29191.01445

5. Long H., Zhu D., Pan J., Li S., Yang C., Guo Z. Advanced processing techniques and impurity management for high-purity quartz in diverse industrial applications, *Minerals*, 2024, vol. 14, no. 6, 571 p. DOI: 10.3390/min14060571

6. Chen W., Yuan L., Zhang B., Yu Q., Lian Z., Pi Y., Shan C., Shum P. Applications and development of multi-core optical fibers. *Photonics*, 2024, vol. 11, no. 3, 270 p. DOI: 10.3390/photonics11030270
7. Schuster K., Unger S., Aichele C. Lindner, F., Grimm S., Litzkendorf D., Kobelke J., Bierlich J., Wondraczek K., Bartelt H. Material and technology trends in fiber optics. *Advanced Optical Technologies*, 2014, vol. 3, no. 4, pp. 447-468. DOI: 10.1515/aot-2014-0010
8. Leich M., Just F., Langner A., Such M., Schötz G., Eschrich T., Grimm S. Highly efficient Yb-doped silica fibers prepared by powder sinter technology. *Optics Letters*, 2011, vol. 36, no. 9, pp. 1557-1559.
9. Borzycki K., Osuch T. Hollow-core optical fibers for telecommunications and data transmission. *Applied Sciences*, 2023, vol. 13, no. 19, 10699 p. DOI: 10.3390/app131910699
10. Jasion G.T., Hayes J.R., Wheeler N.V., Chen Y., Bradley T.D., Richardson D.J., Poletti F. Fabrication of tubular anti-resonant hollow core fibers: modelling, draw dynamics and process optimization. *Opt. Express*, 2019, vol. 27, pp. 20567-20582.
11. Ventura A., Hayashi J., Cimek J., Jasion G., Janicek P., Slimen F., White N., Fu Q., Xu L., Sakr H. et al. Extruded tellurite antiresonant hollow core fiber for Mid-IR operation. *Opt. Express*, 2020, vol. 28, pp. 16542-16553.
12. Bogatyrev V.A. Chapter 15 - Metal-coated fibers. *Specialty Optical Fibers Handbook*. Ed. A. Méndez, T.F. Morse. Academic Press, 2007, pp. 491-512.
13. Schmid S.R. Chapter 4 - Optical fiber coatings. *Specialty Optical Fibers Handbook*. Ed. A. Méndez, T.F. Morse. Academic Press, 2007, pp. 95-122.
14. Paek U.C., Schroeder C.M., Kurkjian C.R. Determination of the viscosity of high silica glasses during fibre drawing. *Glass Technology*, 1988, vol. 29, no. 6, pp. 263-266.
15. Kirchhof J. Chapter 14 - Photonic crystal fibers. *Photonic Crystals: Advances in Design, Fabrication, and Characterization*. Ed. K. Busch, S. Lölkes, R.B. Wehrspohn, H. Föll. John Wiley & Sons, 2004, pp. 266-288.
16. Litzkendorf D., Grimm S., Schuster K., Kobelke J., Schwuchow A. et al. Study of lanthanum aluminum silicate glasses for passive and active optical fibers. *International Journal of Applied Glass Science*, 2012, vol. 3, no. 4, pp. 321-331.

17. Pilz S., Najafi H., Ryser M., Romano V. Granulated silica method for the fiber preform production. *Fibers*, 2017, vol. 5, no. 3, 24 p. DOI: 10.3390/fib5030024
18. Pilz S., Najafi H., El Sayed A., Boas J. et al. Progress in the fabrication of optical fibers by the sol-gel-based granulated silica method. *Proceedings of SPIE Photonics Europe, Brussels, Belgium*, 2016.
19. Bufetova G., Kosolapov A., Yashkov M. et al. Extra-high pressure in the core of silica-based optical fiber preforms during the manufacturing process. *Photonics*, 2023, vol. 10, no. 3, 335 p. DOI: 10.3390/photonics10030335
20. Mysen B. Chapter 5 - Silica. *Silicate Glasses and Melts*. Ed. B. Mysen, P. Richet. Elsevier Science, 2019, pp. 147-163.
21. Pervadchuk V.P., Vladimirova D.B., Dektiarev D.N. Optimal'noe upravlenie teplovym istochnikom vozdeistviia v protsessakh parofaznogo osazhdeniia [Optimal control of thermal exposure source in the processes of vapor phase deposition]. *Problemy upravleniia*, 2020, no. 6, pp. 71-80.
22. Pervadchuk V.P., Vladimirova D.B., Derevyankina A.L. Manufacturing quartz hollow fibers: solution to the problem of stability in the drawing of capillaries instruments and experimental techniques. *Instruments and Experimental Techniques*, 2023, vol. 66, no. 5, pp. 881-890.
23. Pervadchuk V., Vladimirova D., Gordeeva I., Kuchumov A.G., Dektyarev D. Fabrication of silica optical fibers: optimal control problem solution. *Fibers*, 2021, vol. 9, no. 12, 77 p. DOI: 10.3390/fib9120077
24. Vladimirova D., Pervadchuk V., Konstantinov Y. Manufacture of microstructured optical fibers: problem of optimal control of silica capillary drawing process. *Computation*, 2024, vol. 12, no. 5, 86 p. DOI: 10.3390/computation12050086
25. Walker K.L., Geyling F.T., Nagel S.R. Thermophoresis deposition of small particles in the modified chemical vapor deposition (MCVD) process. *Journal of the American Ceramic Society*, 1980, vol. 63, no. 9-10, pp. 552-558.
26. Park K.S., Choi M. Conjugate heat transfer and particle deposition process: effect of torch speed and solid layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1994, vol. 37, no. 11, pp. 1593-1603.
27. Park K.S., Choi M., Chung J.D. Unsteady heat and mass transfer on the codeposition of SiO₂/GeO₂ during the modified chemical vapor deposition process. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, vol. 43, no. 17, pp. 3209-3217. DOI: 10.1016/S0017-9310(99)00352-X

Сведения об авторах

Первадчук Владимир Павлович (Пермь, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Прикладная математика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: pervadchuk@mail.ru).

Владимирова Дарья Борисовна (Пермь, Российская Федерация) – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Прикладная математика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: da0807@mail.ru).

About the authors

Vladimir P. Pervadchuk (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Mathematics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: pervadchuk@mail.ru).

Daria B. Vladimirova (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr, e-mail: da0807@mail.ru).

Поступила: 21.08.2025. Одобрена: 02.09.2025. Принята к публикации: 15.09.2025.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Авторы сделали равноценный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Первадчук, В.П. Управление технологическим процессом жакетирования кварцевых труб / В.П. Первадчук, Д.Б. Владимирова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2025. – № 55. – С. 142–169. DOI: 10.15593/2224-9397/2025.3.07

Please cite this article in English as:

Pervadchuk V.P., Vladimirova D.B. Process control for jacketing quartz tubes. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2025, no. 55, pp. 142-169. DOI: 10.15593/2224-9397/2025.3.07