

Научная статья

Математическое моделирование тепломассопереноса в газе и кварцевой трубке при процессе MCVD

*Д.А. Кустов^{1,2}, И.Л. Никулин¹, Т.Э. Семенов^{1,2}*¹ Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация² Пермская научно-производственная приборостроительная компания, Пермь, Российская Федерация

Исследуются процессы, протекающие при изготовлении заготовок оптических волокон, в частности, процесс тепломассопереноса при легировании кварцевых трубчатых заготовок по технологии модифицированного химического осаждения из паровой фазы (MCVD). Разработана математическая модель тепломассопереноса в кварцевой трубке и прокачиваемом газе, учитывающая неоднородный нагрев трубки от газовой горелки, свободную конвекцию и излучение с внешней поверхности трубки, а также вынужденную конвекцию и поглощение излучения в прокачиваемом газе. Описание тепломассопереноса построено на уравнениях Навье–Стокса, переноса тепловой энергии с учетом излучения и неразрывности для сжимаемой среды. В модели учтены зависимости от температуры теплофизических свойств прокачиваемого газа и кварцевой трубки. Задача решается в системе отсчета, связанной с вращающейся трубкой. Численная реализация модели выполнена в трехмерной постановке в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Модель верифицирована на задачах с известными решениями, таких как прокачка газа через однородно нагреваемую трубку, теплопроводность и излучение в полости, заполненной поглощающим газом. Показана адекватность модели путем сопоставления расчетного и экспериментального профилей температуры на поверхности трубки во время технологического процесса. Погрешность моделирования температурного поля составляет не более 1.1%. Приведены результаты моделирования влияния расхода прокачиваемого газа и подводимой тепловой мощности на температурные и скоростные поля в трубке и газе. Выявлено, что подводимая мощность сказывается на абсолютных значениях температуры, но не меняет структуру полей скорости и температуры. Расход газа влияет как на абсолютные значения, так и на структуру полей. Определены диапазоны параметров, обеспечивающих требуемые условия процесса MCVD. Намечены пути развития математической модели.

Ключевые слова: парофазное осаждение, вынужденная конвекция, свободная конвекция, тепловое излучение, верификация модели

Получение: 29.08.2025 / Публикация онлайн: 05.08.2026

УДК 532.5

1. Введение

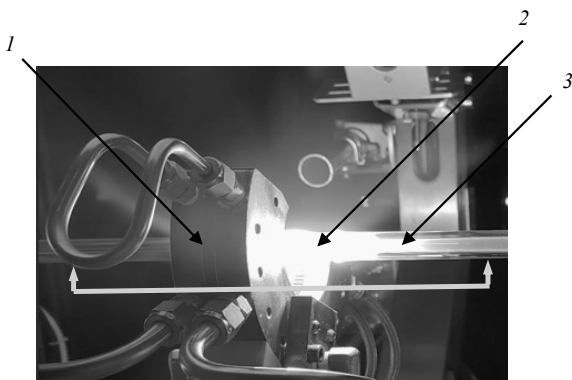


Рис. 1. Установка MCVD: 1 – горелка; 2 – зона нагрева; 3 – кварцевая трубка; снизу линией со стрелками показана длина исследуемой области

Современные технологии производства оптического волокна предъявляют исключительные требования к формированию микроструктуры внутренних слоев. Одним из ключевых методов создания таких заготовок является модифицированное химическое осаждение из паровой фазы — Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD), фотография установки показана на рисунке 1. Процесс MCVD происходит внутри кварцевой трубки. С одного конца в нее подаются газообразные хлориды кремния, германия и фосфора, которые служат связующими и легирующими компонентами для стекла, а также кислород в качестве окислителя. Во время процесса трубка вращается для обеспечения равномерного распределения материалов. С внешней стороны трубку нагревает движущаяся кислородно-водородная горелка. Когда газовая смесь проходит через зону с температурой 1200...1600 °C, происходит реакция

окисления. В результате образуются мельчайшие частицы кварцевого стекла, которые осаждаются на внутреннюю поверхность трубки сразу за горячей зоной и спекаются в прозрачный и однородный слой. Горелка совершает многократные проходы и способствует послойному наращиванию заготовки будущей стеклянной сердцевины оптического волокна с заданными свойствами. После завершения формирования заготовки в полости трубки создается разрежение, а поверхность по-прежнему нагревается горелкой. При этом атмосферное давление и силы поверхностного натяжения сжимают трубку. Далее образованный сплошной стеклянный цилиндр разрезается на части и масштабируется до нужного диаметра путем вставки заготовки в кварцевую трубку большего диаметра. После выполнения дополнительных операций заготовка вытягивается в волокно, после чего наносится защитное покрытие — таким образом получается всем известное оптическое волокно [1–4].

Для управления процессом можно варьировать следующие параметры: объемный расход газов, скорость движения горелки, температуру горения, частоту вращения трубки и другие. Неудачно подобранное значение какого-либо параметра может оказать негативное влияние на качество заготовки и, как следствие, оптического

волокна. Нелинейность нагрева, микродефекты, локальные напряжения приводят к снижению механической прочности волокна и ухудшению его оптических свойств.

Для решения этих проблем в течение последних десятилетий активно развивается направление математического моделирования MCVD-процесса. В работах [5–9] описаны математические модели, в основе которых лежат уравнения гидродинамики, тепломассопереноса или химической кинетики в процессе MCVD. Критическим ограничением многих существующих моделей [10–13] является осесимметричная постановка, которая не учитывает вращение трубки и возникающие при этом неоднородности состава осаждающихся легирующих компонентов. Построение надежной математической модели MCVD требует поэтапной верификации основных физических механизмов, действующих во время процесса. К ним относятся вынужденная конвекция газа внутри трубки в условиях внешнего нагрева и поглощение излучения средой. Точное предсказание полей скорости и температуры конвективного потока газа является фундаментом для последующего моделирования кинетики реакций и терморефракции частиц.

Таким образом, цель настоящей работы заключается в разработке и верификации математической модели сопряженного тепломассопереноса для процесса MCVD и определении с ее помощью влияния основных технологических факторов на поля скорости и температуры в газе. Для достижения цели решаются частные задачи:

- разработка математической модели технологической установки, которая описывает перенос тепла в кварцевой трубке, а также тепломассоперенос в газе конвекцией и излучением;
- верификация модели на задачах с известными решениями (например, вынужденная конвекция в трубе и плоском слое с учетом излучения);
- проверка адекватности моделирования технологического режима;
- моделирование влияния технологических параметров на температурное и скоростное поля в газе.

2. Математическая модель тепломассопереноса в процессе MCVD

На основании конструкции технологической установки для MCVD (см. Рис. 1) разработана расчетная схема задачи, которая представлена на рисунке 2. При формулировке модели сделаны следующие допущения: задача тепломассопереноса в газе и трубке решается в трехмерной постановке и на первоначальном этапе (при $t = 0$) обладает осевой симметрией. Исходя из этого описание граничных условий естественно вести в терминах радиальной r и продольной z координат; переход к декартовым координатам осуществляется преобразованиями: $r_{rz} = \sqrt{x_{yz}^2 + y_{yz}^2}$, $z_{rz} = z_{xyz}$. В поле силы тяжести вращение трубки с угловой скоростью ω и нагрев газа приводят к нарушению осевой симметрии полей температуры и скорости газа.

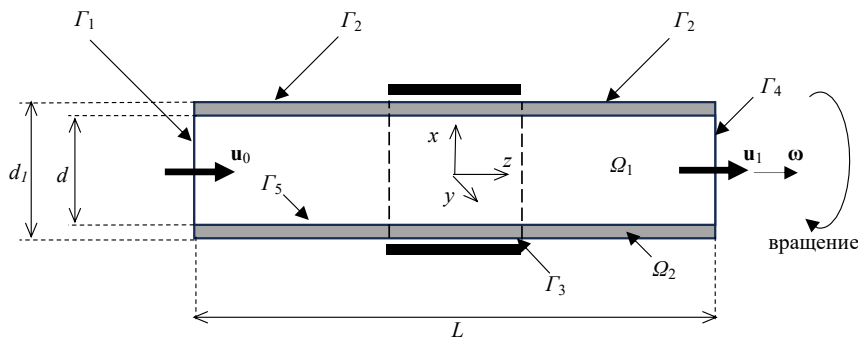


Рис. 2. Расчетная схема задачи; символами Ω и Γ обозначены расчетные зоны и поверхности: Ω_1 – газовая среда; Ω_2 – кварцевая трубка; Γ_1 – вход газа; Γ_2 – внешняя поверхность трубки; Γ_3 – зона действия горелки; Γ_4 – выход газа; Γ_5 – внутренняя поверхность трубки; черными прямоугольниками обозначена горелка

Рассматривается кварцевая трубка длиной L и диаметрами d (внутренним) и d_1 (наружным), через которую прокачивается газ. Расчетная область включает две зоны: газ внутри твердой кварцевой трубки — Ω_1 ($r \in [0; d/2]$, $z \in [0; L]$) и саму трубку — Ω_2 ($r \in [d/2; d_1/2]$, $z \in [0; L]$). На левом торце области Ω_1 (граница Γ_1 ($r \in [0; d/2]$, $z = 0$)) известны профиль скорости и температура газа. Внешняя поверхность трубки вне горелки (граница Γ_2 ($r = d_1/2$, $z \in [0; z_0 - w]$ и $r = d_1/2$, $z \in [z_0 + w; L]$), здесь z_0 и w — координата горелки и полуширина зоны ее действия) находится в условиях свободной тепловой конвекции с окружающей средой комнатной температуры. В зоне горелки (граница Γ_3 ($r = d_1/2$, $z \in [z_0 - w; z_0 + w]$)) имеет место локальный нагрев — задается распределение плотности теплового потока. На правом торце области Ω_1 (граница Γ_4 ($r \in [0; d/2]$, $z = L$)) ставится условие свободного выхода газа в атмосферу. На сопряжении областей Ω_1 и Ω_2 (граница Γ_5 ($r = d/2$, $z \in [0; L]$)) выполняется условие теплообмена газа с твердой стенкой трубки и полное прилипание к ней. Вращение трубки имитируется вращением поля силы тяжести. На этапе верификации и оценки влияния на процесс технологических параметров в трубку подается газ. В настоящей работе расчеты выполняются для воздуха.

Моделирование теплообмена представляет собой основную часть исследования процесса MCVD. В рассматриваемой работе решается краевая задача нестационарного тепломассопереноса, учитывающая

конвективный теплообмен, излучение и неравномерный нагрев от кислородно-водородной горелки. Режим течения в трубке определяет величина числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho_g u_0 d}{\mu_g}, \quad (1)$$

где ρ_g — плотность, μ_g — коэффициент динамической вязкости, u_0 — средняя скорость потока, которая находится через массовый расход Q :

$$u_0 = \frac{4Q}{\pi d^2}. \quad (2)$$

Формула (2) с параметрами $Q = 0.47 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, $d = 0.02 \text{ м}$ дает скорость $u_0 = 0.15 \text{ м/с}$. Таким образом, число Рейнольдса (1) равняется $Re = 195$. Для круглой трубы это значение меньше критического 2300, при котором ламинарное течение теряет устойчивость [14, 15]. Следовательно, течение газа можно считать ламинарным, и применение специальных моделей турбулентности не требуется.

Итак, ламинарное течение газовой среды (воздуха) в зоне Ω_1 моделируется с помощью уравнений [16–19]:

$$\rho_g \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu_g \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right) \right) + \nabla (\zeta \nabla \cdot \mathbf{u}) + \rho_g \mathbf{g} + 2\rho_g (\mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_g \mathbf{u}) = 0, \quad (4)$$

$$\rho_g C_g \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) T \right) = \nabla \cdot (\lambda_g \nabla T) - \nabla \cdot \mathbf{q}_{rad} + \Phi, \quad (5)$$

где (3) — уравнение Навье–Стокса с учетом сил плаучести и сил Кориолиса, (4) — уравнение неразрывности для сжимаемого газа, (5) — уравнение переноса тепловой энергии. При этом приняты обозначения: $\mathbf{u}$ — вектор скорости; t — время; ∇ — дифференциальный оператор набла; p — давление; $\mathbf{I}$ — единичный тензор; ζ — объемная вязкость; $\mathbf{g}$ — вектор ускорения свободного падения; T — температура; C_g — удельная теплоемкость при постоянном давлении; λ_g — коэффициент теплопроводности; $\mathbf{q}_{rad}$ — плотность потока излучения; Φ — мощность тепловых источников в единице объема, вызванная, например, химическими реакциями.

Уравнению состояния воздуха в зоне Ω_1 соответствует уравнение для идеального газа:

$$\rho_g = \frac{Mp}{RT}, \quad (6)$$

где M — молярная масса, $R = 8.31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ — универсальная газовая постоянная.

В прозрачной кварцевой трубке (см. зону Ω_2) тепловая энергия переносится за счет теплопроводности и излучения:

$$\rho_t C_t \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_t \nabla T) - \nabla \cdot \mathbf{q}_{rad}. \quad (7)$$

В системе отсчета, связанной с трубкой, вращение последней моделируется поворотом вектора силы тяжести $\mathbf{g}$, который в декартовой системе координат имеет вид:

$$\mathbf{g} = g(\cos(\omega t) \mathbf{e}_x + \sin(\omega t) \mathbf{e}_y). \quad (8)$$

Здесь g — ускорение свободного падения; ω — угловая скорость вращения трубки; $\mathbf{e}_x$ и $\mathbf{e}_y$ — единичные координатные векторы.

Для решения системы уравнений (3)–(8) требуется также определить условия на границах расчетных областей. На входе в кварцевую трубку (Γ_1) задаются параболический профиль скорости, соответствующий режиму ламинарного течения — уравнение Хагена–Пуазейля, и однородный профиль температуры:

$$\mathbf{u}_{in}(r) = 2\mathbf{u}_0 \left(1 - \left(\frac{r}{d/2} \right)^2 \right), \quad (9)$$

$$T_{in} = T_0,$$

где r — расстояние от оси симметрии трубки, $T_0 = T_{atm} \approx 20^\circ \text{C}$ — температура воздуха на входе. На выходе из трубки (Γ_4) ставятся условия постоянства давления и теплового потока:

$$p = p_{atm}, \quad (10)$$

$$\mathbf{q} = (\rho_g \mathbf{u}_1)(C_g(T - T_0)),$$

где $\mathbf{u}_1$ — скорость потока газа на выходе, определяемая из расчета.

На внутренней поверхности трубки (Γ_5) для газа (воздуха) выполняется условие полного прилипания: $\mathbf{u} = 0$. Теплообмен на внутренней поверхности характеризуется конвективным отводом тепла в прокачиваемый газ и описывается законом Ньютона–Рихмана:

$$q(z) = h_{fc}(T_g(z) - T_t(z)), \quad (11)$$

при этом h_{fc} — коэффициент теплоотдачи вынужденной конвекции, $T_g(z)$ и $T_t(z)$ — температура газа и температура внутренней поверхности кварцевой трубки соответственно.

На внешней поверхности трубки, удаленной от горелки (Γ_2), граничное условие обусловливается совместным механизмом конвекции и излучения, при этом плотность теплового потока задается уравнением:

$$q = (h_{nc} + h_{rad})(T - T_0), \quad (12)$$

где h_{nc} , h_{rad} — коэффициенты теплоотдачи свободной конвекции и излучения. Конвективный коэффициент теплоотдачи как для вынужденной, так и для свободной конвекции определяется через число Нуссельта Nu [20]:

$$h_c = (\lambda/d) Nu. \quad (13)$$

Коэффициент излучения вычисляется как

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma_B (T + T_0)(T^2 + T_0^2), \quad (14)$$

где ε — степень черноты, σ_B — постоянная Стефана–Больцмана.

На внешнюю поверхность трубки, в рабочей зоне горелки (Γ_3), действует радиальный тепловой поток плотностью:

$$q_r(z) = P \left[\exp\left(-\frac{(z - z_0(t))^2}{2w^2}\right) - \frac{1}{7} \exp\left(-\frac{(z - z_0(t) + 0.01)^2}{2(w/4)^2}\right) \right], \quad (15)$$

где P — тепловая мощность, отнесенная к единице площади, $z_0(t) = u_{burn}t$ — координата центра горелки, движущейся со скоростью u_{burn} .

Формула (15) является оригинальной, предлагается авторами в соответствии с подходами [21–25] и с учетом следующих соображений: первое слагаемое описывает идеализированный поток с гауссовым распределением плотности; с помощью второго слагаемого расчетный профиль теплового потока приводится к профилю реальной технологической горелки. Обоснованность такого вида формулы подтверждается далее (см. подраздел 3.3).

Коэффициент динамической вязкости, коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость, плотность и коэффициент объемного расширения зависят от температуры. Для удобства численной реализации экспериментальные зависимости представляются степенными рядами:

$$\mu(T) = \sum_{j=0}^{N_p} \tilde{\mu}_j T^j, \quad (16)$$

где $\tilde{\mu}_n$ — коэффициенты при степенях температуры, j — степень полинома, N_p — общее число степеней температуры. Параметры воздуха по степеням температуры вычисляются с помощью блока свойств Materials программного комплекса COMSOL. Их значения приведены в таблице [26].

Таблица. Свойства воздуха при разном числе членов аппроксимирующего полинома

Степень полинома j	Коэффициент динамической вязкости $\tilde{\mu}_g$, Па·с/К ^{j}	Удельная теплоемкость $\tilde{C}_g$, Дж/(кг·К)/К ^{j}	Коэффициент теплопроводности $\tilde{\lambda}_g$, Вт/(м·К)/К ^{j}	Плотность $\tilde{\rho}_g$, кг/м ³ /К ^{j}
0	$-8.383 \cdot 10^{-7}$	1047.6	-0.002	2.740
1	$8.357 \cdot 10^{-8}$	-0.373	$1.155 \cdot 10^{-4}$	-0.008
2	$-7.694 \cdot 10^{-11}$	$9.453 \cdot 10^{-4}$	$-7.903 \cdot 10^{-8}$	$1.000 \cdot 10^{-5}$
3	$4.644 \cdot 10^{-14}$	$-6.024 \cdot 10^{-7}$	$4.121 \cdot 10^{-11}$	$-5.976 \cdot 10^{-9}$
4	$-1.066 \cdot 10^{-17}$	$1.286 \cdot 10^{-10}$	$-7.439 \cdot 10^{-15}$	$1.337 \cdot 10^{-12}$

Расчет излучения производится методом сферических гармоник [27–29] (с использованием процедуры P₁-аппроксимации). P₁-аппроксимация основана на разложении интенсивности излучения в ряд по сферическим гармоникам. Интенсивность представляется в следующем виде:

$$I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = \frac{1}{4\pi} (G(\mathbf{r}) + 3\mathbf{q}_{rad} \cdot \mathbf{s}), \quad (17)$$

$$G(\mathbf{r}) = \int_{4\pi} I(\mathbf{r}, \mathbf{s}) d\psi,$$

где $\mathbf{r}$ — радиус-вектор положения излучающей поверхности, $\mathbf{s}$ — единичный вектор направления распространения излучения, G — диффузия излучения, ψ — бесконечно малый телесный угол, под которым излучение распространяется в направлении $\mathbf{s}$.

На излучающие поверхности накладываются условия Маршака:

$$\mathbf{n} \cdot \nabla G(\mathbf{r}) = \frac{\varepsilon}{2-\varepsilon} \frac{3k+3\sigma_s-A\sigma_s}{2} (4\pi I_b - G(\mathbf{r})), \quad (18)$$

при этом $\mathbf{n}$ — вектор единичной нормали, k — коэффициент поглощения, σ_s — коэффициент рассеяния, A — коэффициент линейного анизотропного рассеяния, I_b — излучательная способность абсолютно черного тела.

Математическая модель реализована в программном комплексе COMSOL Multiphysics.

3. Верификация модели

3.1. Теплоотдача при вынужденной конвекции

Рассматривается прокачка газа через трубку. Решаются уравнения переноса и неразрывности (3)–(6) с условиями на границе Γ_5 (кварцевый слой во внимание не принимается): задана постоянная плотность теплового потока $q_L = 10 \text{ Вт/м}^2$. Условия на входе (Γ_1) и выходе (Γ_4) газа описываются, соответственно, формулами (9), (10).

Валидация теплоотдачи осуществляется по аналогии с работами [30, 31], а именно по интегральному параметру — числу Нуссельта Nu , характеризующему интенсивность конвективного теплообмена. Известные из них решения для течения в трубах с однородным тепловым потоком на стенке используются в качестве эталона.

Аналитический расчет числа Нуссельта представлен в работе [32]:

$$Nu_z = 4.364 \left[1 + (Gz/29.6)^2 \right]^{1/6} \left[1 + \left(\frac{Gz/19.04}{\left[1 + (Pr/0.0207)^{2/3} \right]^{1/2} \left[1 + (Gz/29.6)^2 \right]^{1/3}} \right)^{3/2} \right]^{1/3}, \quad (19)$$

где $Gz = \frac{\pi d Re Pr}{4z}$ — число Гретца, которое определяет соотношение между теплоемкостью и теплопроводностью жидкости, $Pr = \frac{\mu_g C_g}{\lambda_g}$ — число Прандтля.

В верификационных расчетах используются параметры: диаметр трубки $d = 0.02 \text{ м}$; длина трубки $L = 1 \text{ м}$; плотность теплового потока $q_L = 10 \text{ Вт/м}^2$; начальная температура газа $T_0 = 20^\circ\text{C}$; характерная скорость потока $u_0 = 0.1 \text{ м/с}$; рабочая среда — воздух.

Число Нуссельта для расчетов по модели вычисляется следующим образом:

$$Nu = h_{fc} \frac{d}{\lambda_g} = \frac{qd}{(T - T_b)\lambda_g}, \quad (20)$$

где T_b — средняя температура в поперечном сечении трубки.

Для дискретизации расчетной области применяется структурированная сетка из 8-узловых конечных элементов. Для корректного разрешения больших градиентов в пристеночной области вводится пограничный слой, состоящий из четырех слоев элементов меньшего размера. Вид расчетных сеток показан на рисунке 3. Грубая сетка содержит $n_1 = 65000$ элементов, имеющих размер $\Delta x_1 \in [7.9 \cdot 10^{-4}; 2.6 \cdot 10^{-3}] \text{ м}$, у промежуточной сетки $n_2 = 139392$ элементов, размер которых $\Delta x_2 \in [3.1 \cdot 10^{-4}; 1.6 \cdot 10^{-3}] \text{ м}$, у мелкой $n_3 = 600000$ элементов размером $\Delta x_3 \in [5.8 \cdot 10^{-5}; 9.1 \cdot 10^{-4}] \text{ м}$.

При проведении расчетов выявлено влияние дискретизации (вида расчетной сетки) на интенсивность конвективного теплообмена. На рисунке 4а для сравнения представлены распределения вдоль трубки числа

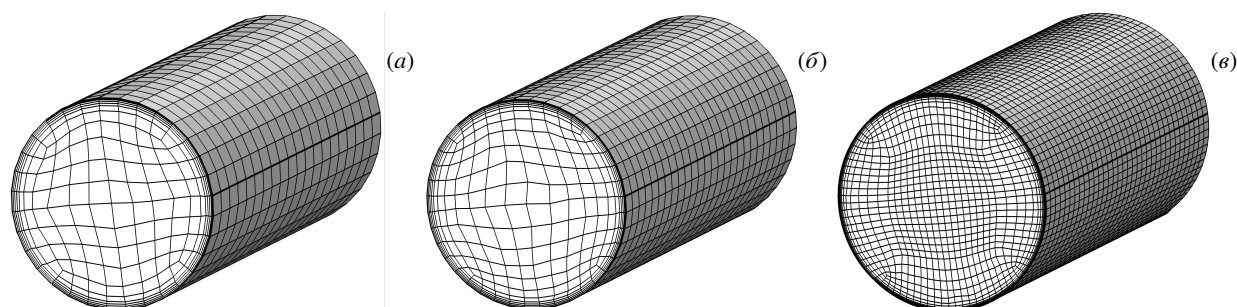


Рис. 3. Конечно-элементные сетки: грубая $n_1 = 65000$ (а), промежуточная $n_2 = 139392$ (б), мелкая $n_3 = 600000$ (в)

Нуссельта, рассчитанные аналитически и численно. Видно, что мелкая сетка обеспечивает более точное решение. Качество решения определяется суммарной погрешностью:

$$\delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(1 - \frac{Nu_{num,i}^{(n)}}{Nu_{an,i}} \right),$$

здесь n — общее количество элементов, N — количество рассматриваемых поперечных сечений вдоль трубки, i — номер поперечного сечения, $Nu_{num,i}^{(n)}$, $Nu_{an,i}$ — расчетное и аналитическое числа Нуссельта, рассчитанные для i -го сечения. Зависимость суммарной погрешности от количества элементов сетки показана на рисунке 4б.

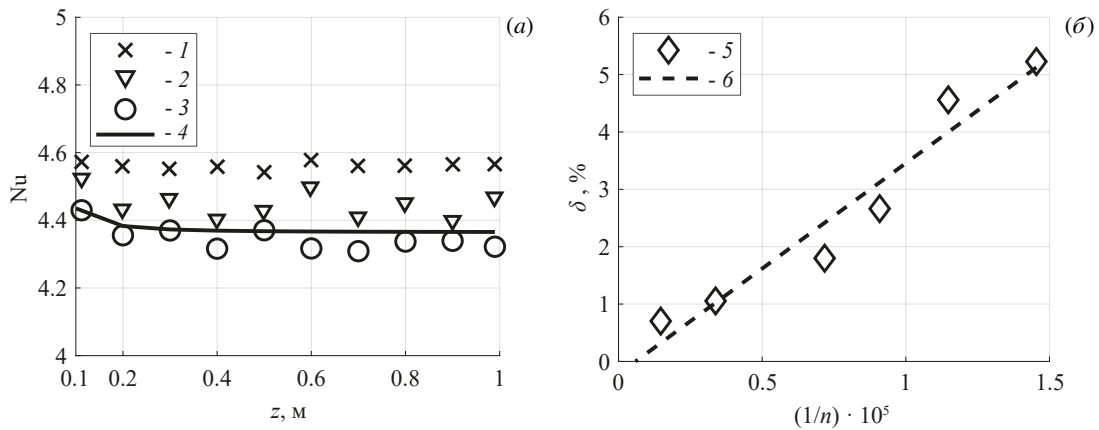


Рис. 4. Число Нуссельта в зависимости от длины трубки, полученное на разных видах сетки (а): грубая (1), промежуточная (2), мелкая (3); аналитическое решение (4); к оценке сходимости при сгущении сетки (б): расчетные значения числа Нуссельта (5) и их аппроксимация (6)

Из рисунка 4 видно, что установившееся значение числа Нуссельта, полученное в численном эксперименте на мелкой сетке, составляет $Nu = 4.3$, что согласуется с известным значением для такого течения. Суммарная погрешность убывает при сгущении сетки и при $n = 6 \cdot 10^5$ составляет 0.70%. Сетка этого вида является компромиссом между точностью и временем расчета. Таким образом, тепломассоперенос при вынужденной конвекции реализуется в модели корректно.

3.2. Теплопередача с учетом излучения

Для верификации теплопередачи излучением тестовой служит задача, решенная в работе [33]. Рассматривается теплопередача через полость шириной $2H$ и высотой H . Ее левая половина заполнена статичным газом, правая является твердой. В твердой среде перенос тепла осуществляется теплопроводностью, в газе — теплопроводностью и излучением. Излучение с учетом объемного поглощения энергии описывается P_1 -моделью излучения (17), (18). Для верификации используются начальные параметры: высота полости $H = 1$ м; температура левой стенки $T_h = 1000$ К; температура правой стенки $T_c = 0$ К; теплоемкость сред $C = 10^3$ Дж/(кг·К); соотношение теплопроводностей $\lambda_t / \lambda_g = 4$; коэффициент поглощения $k = 1$ 1/м; коэффициент рассеяния $\sigma_s = 0$ 1/м; степень черноты $\varepsilon = 1$. Для определения влияния излучения на теплопередачу вводится безразмерный параметр проводимости излучения, называемый также числом Старка:

$$N_{cr} = \frac{(k + \sigma_s) \lambda}{4 \sigma_B T^3}.$$

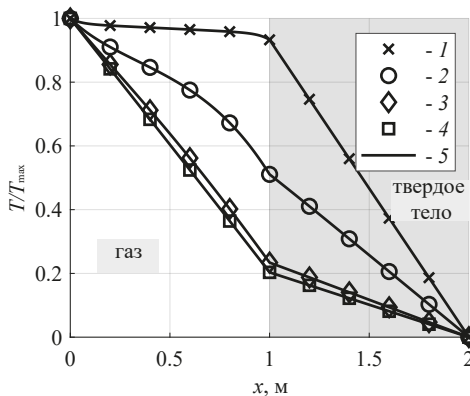


Рис. 5. Изменение температуры при разных значениях числа Старка N_{cr} : 0.01 (1); 0.1 (2); 1.0 (3); ∞ (4); аналитическое решение [33] (5)

На рисунке 5 представлено распределение температуры в расчетной области при $k = 1$ и варьируемых значениях числа Старка. Результаты моделирования показывают, что в твердом теле распределение температуры имеет линейный характер, в газовой же среде характер распределения существенно зависит от поглощения излучения. В случае пренебрежимо малого поглощения наблюдается линейное снижение температуры как в газовой, так и в твердой средах. При высоких значениях этого параметра доминирующим механизмом переноса энергии является теплопроводность, что также приводит в пределе к формированию линейного профиля температуры. С уменьшением безразмерного параметра относительный вклад радиационного переноса становится

более значительным. Нелинейность температурного профиля в газе нарастает (Рис. 5, линии 1, 2), что явно указывает на усиление влияния внутреннего радиационного теплообмена. Приведенные результаты согласуются со значениями из работы [33], что подтверждает корректность реализации механизма теплопередачи в газе с учетом объемного поглощения энергии.

Таким образом, выполненное параметрическое исследование демонстрирует, что пренебрежение излучением может привести к существенной погрешности в прогнозировании температурных полей, особенно в условиях низкой теплопроводности газовой среды.

3.3. Тепловое поле в зоне действия водородной горелки

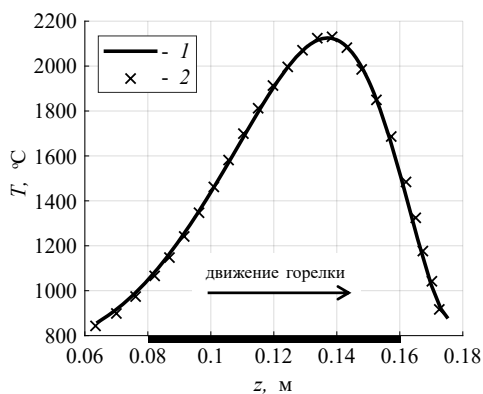


Рис. 6. Распределение температуры на поверхности трубки в зоне действия горелки: численные результаты (1), экспериментальные данные (2); черным прямоугольником показано положение горелки

когда горелка смещается вправо. Конструкция и режим работы горелки объясняют асимметрию профиля и сдвиг температурного максимума (вершины графика) в правую сторону — в зону, которая наиболее интенсивно нагрета.

Экспериментальный профиль температуры позволил авторам построить оригинальную формулу для оценки распределения плотности теплового потока на поверхности трубки в зоне действия горелки — формулу (15). В результате сравнения экспериментальных данных с модельными получено качественное и количественное соответствие с относительным отклонением 1.1%.

Таким образом, корректность результатов работы отдельных блоков математической модели, сходимости решения на сгущающейся сетке и моделирования полного процесса MCVD служит основанием для вывода об адекватности представленной математической модели.

4. Моделирование влияния технологических параметров состояния газа

4.1. Общая картина процесса MCVD

На рисунке 7 представлены поля температуры и магнитуды скорости, рассчитанные по уравнениям (3)–(18) с начальными параметрами процесса MCVD, перечисленными в подразделе 3.3; теплофизические свойства воздуха приведены в таблице. Расчетное распределение плотности теплового потока на поверхности трубки соответствует распределению в технологическом процессе (см. (15) и Рис. 6). Рисунок 7а содержит совмещенные поля температуры (заливка) и скорости (стрелки); длина стрелок не связывается с модулем скорости, они лишь показывают направления движения воздуха. На рисунке 7б приведено поле магнитуды скорости. Дополнительно демонстрируются поля в поперечных сечениях трубки, которые отражают состояние системы в момент времени $t = 150$ с. К этому моменту горелка находится на конце исследуемой области, и появляется возможность увидеть систему как до, так и после действия нагрева. Направление вектора ускорения свободного падения на всех рисунках изображается стрелкой.

Анализ результатов расчета выявил, что движение горелки и профиль теплового потока приводят к несимметричному распределению температуры в трубке: ее прогретая зона остается позади прошедшей горелки, а прокачиваемый газ постепенно охлаждает внутреннюю поверхность трубки.

Течение газа имеет выраженную ламинарную природу. До зоны воздействия горелки сохраняется пуазейлевский профиль скорости. Однако при возникновении значительных температурных градиентов в зоне нагрева структура потока изменяется. Поскольку газ при движении вдоль трубки разогревается постепенно, между внутренней стенкой трубки и центральной областью газовой среды формируется перепад температуры. Это приводит к изменению плотности газа. Неоднородность плотности среды является причиной образования градиентов давления, нарушающих исходный пуазейлевский профиль. Таким образом, в поперечном сечении трубки перед зоной нагрева (см. сечение I, Рис. 7а) возникает конвективное течение двух симметричных потоков от стенок к центру сечения, что вызвано нагревом и расширением газа в направлении от стенки трубки.

В зоне нагрева (сечение II) повышение температуры и расширение газа ускоряют его течение вдоль трубки (на

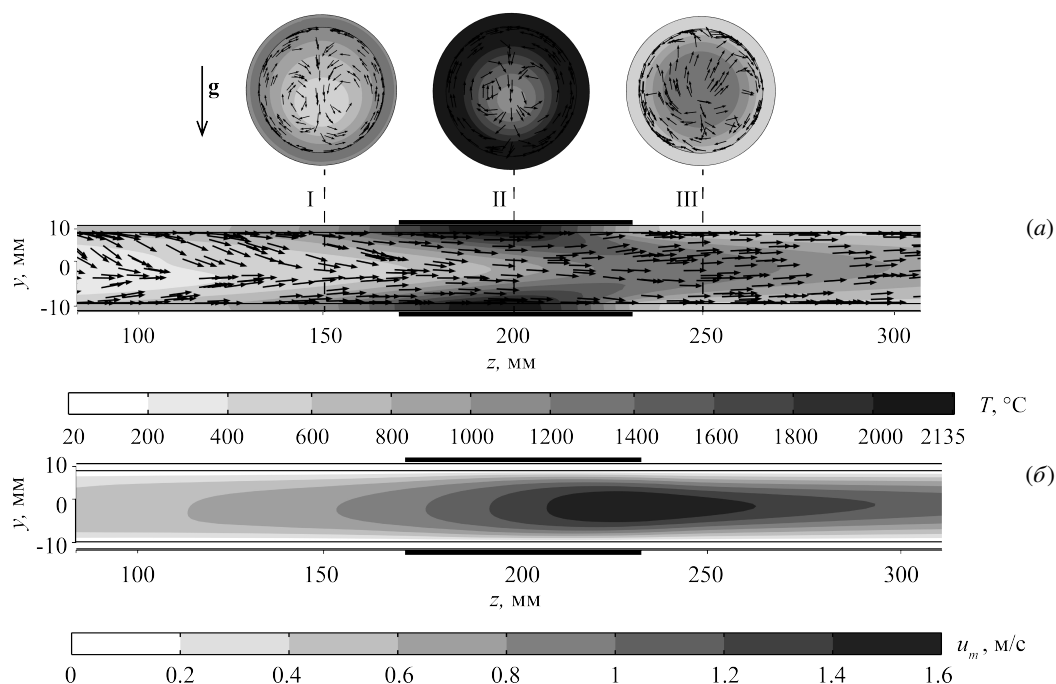


Рис. 7. Распределение температуры (а) и поле магнитуды скорости в зоне действия горелки (б) в момент времени $t = 150$ с; показано стрелками направление потока, прямоугольниками сверху и снизу трубы – положение горелки

рисунке 7б видно, что модуль скорости увеличивается). В результате максимальная скорость потока ($u = 1.6$ м/с) наблюдается именно в начале зоны действия горелки, где градиенты температуры наибольшие.

При выходе из зоны нагрева (сечение III) газ начинает охлаждаться в направлении от стенок и уменьшаться в объеме. Это приводит к опускным течениям у стенок трубки и восходящим в ее центральной зоне и может играть значимую роль в переносе и осаждении частиц. Следует отметить, что максимальная скорость после зоны нагрева достигает 1.6 м/с при температуре 1300°C. Это соответствует числу Рейнольдса $Re = 231$, рассчитанному для параметров газа (здесь — воздуха), взятых при соответствующей температуре: $\rho_g = 0.320$ кг/м³ и $\mu_g = 4.43 \cdot 10^{-5}$ Па·с. Общий режим течения — ламинарный. Таким образом, применение ламинарной модели течения обосновано во всем диапазоне свойств и скоростей газа в рассматриваемом процессе.

Рисунок 8 демонстрирует изменение поля радиальной скорости в тех же трех сечениях I, II, III, что и на рисунке 7. На рисунке 8а видно, что радиальные потоки образуют двухвихревое течение, небольшая асимметрия которого обусловлена вращением трубки. В области горелки (Рис. 8б, в) асимметрия сказывается меньше, а на удалении 10 см от горелки опять нарастает. Этот эффект не может быть адекватно описан в упрощенной двумерной или осесимметричной постановках, что подчеркивает важность применяемого авторами здесь трехмерного моделирования.

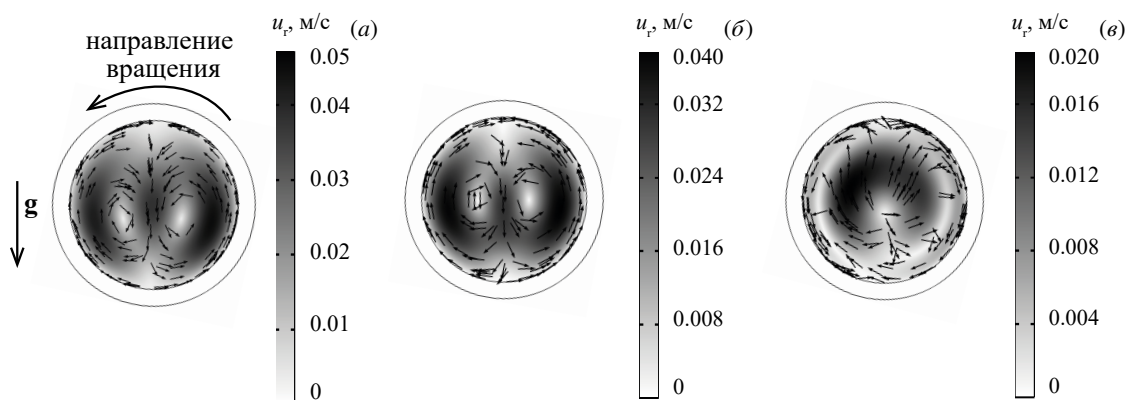


Рис. 8. Мгновенные поля модуля радиальной компоненты скорости в момент времени $t = 150$ с в разных поперечных сечениях трубки: I (а), II (б), III (в)

4.2. Влияние расхода газа и подводимой мощности на распределения температуры и скорости в газе

Ниже представлены результаты параметрического исследования с целью установления количественных зависимостей между технологическими параметрами процесса MCVД и результирующими температурными

полями в прокачиваемом газе. Главными параметрами процесса считаются объемный расход газа — Q ($\text{м}^3/\text{с}$), и мощность теплового воздействия, отнесенная к единице площади — P ($\text{Вт}/\text{м}^2$). На рисунке 9 представлены изолинии скорости и изотермы для стандартных параметров процесса: $Q = 0.47 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$, $P = 2 \text{ МВт}/\text{м}^2$. Поле скорости характеризуется величиной Δl_u , которая (из соображений наглядности) определяется как размер вдоль оси z , ограниченный изолинией $u_{\max}/8$. Поле температуры характеризуется величинами: Δl_T — осевым размером области, ограниченной изотермой 1200°C ; максимальной температурой на поверхности и в окрестности оси вращения трубки. Для изучения берется зона рядом с горелкой, поскольку именно там возникают наибольшие возмущения. Картины полей отвечают состоянию системы в момент времени $t = 150 \text{ с}$; сила тяжести на всех рисунках направлена вертикально вниз.

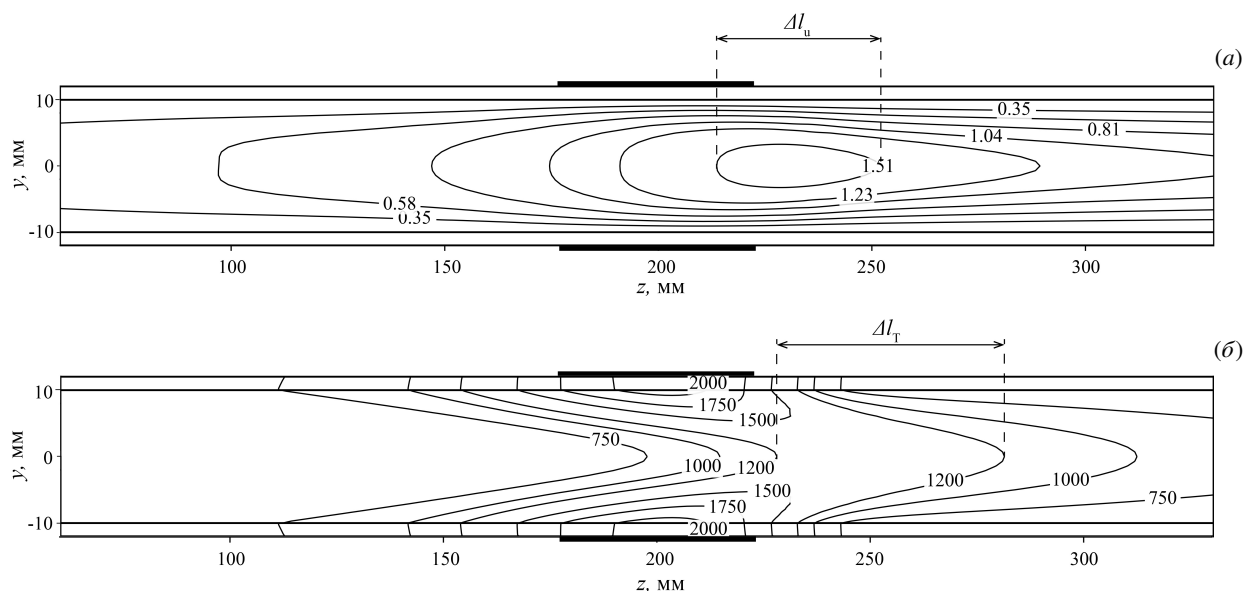


Рис. 9. Изолинии скорости (а) и изотермы (б) при стандартных параметрах процесса MCVD; числа на изолиниях обозначают модуль скорости u (м/с) и температуру T ($^\circ\text{C}$); закрашенный прямоугольник указывает положение горелки

4.3. Влияние расхода газа

Проведено моделирование с расходами газа $Q \cdot 10^4 = \{0.16, 0.30, 0.47, 0.60, 0.75, 0.95\} \text{ м}^3/\text{с}$. Рисунок 10 демонстрирует изолинии и изотермы в зоне действия горелки для двух характерных значений расхода: $0.16 \cdot 10^{-4}$, $0.95 \cdot 10^{-4} \text{ (м}^3/\text{с)}$. При небольших расходах (Рис. 9а, 10а) область максимальной температуры имеет в сечении эллиптическую форму, то есть в объеме это эллипсоид. С ростом расхода эллипсоид деформируется: со стороны заправки газа в трубку образуется лунка, противоположная часть вытягивается вдоль оси трубки, формируется вытянутая область повышенной скорости (Рис. 10б). Увеличение расхода влечет за собой снижение температуры газовой среды (см. Рис. 9б, 10в, г), что объясняется усилением конвективного переноса тепла с ростом скорости потока.

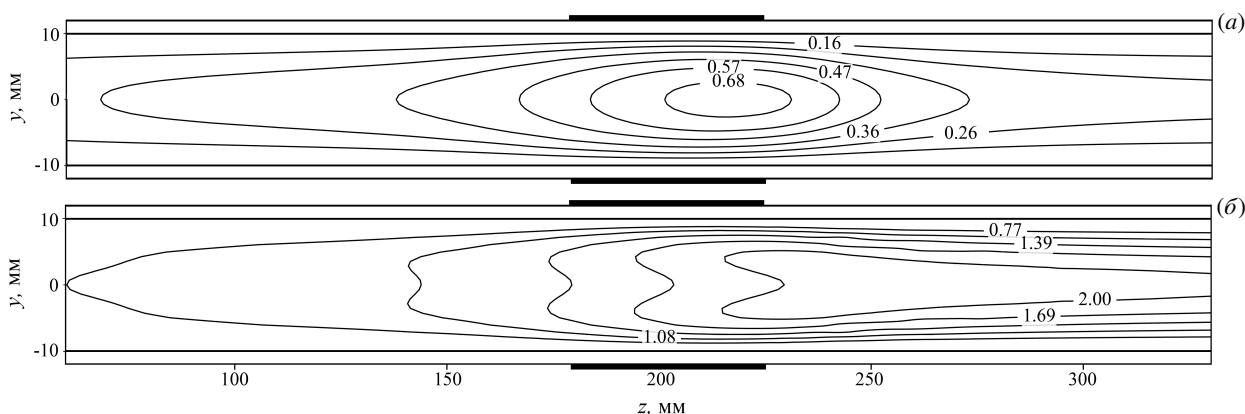


Рис. 10. Изолинии модуля скорости в зоне действия горелки при разном расходе Q , ($\text{м}^3/\text{с}$): $0.16 \cdot 10^{-4}$ (а), $0.95 \cdot 10^{-4}$ (б); изотермы при тех же расходах: (в), (г); числа на изолиниях обозначают модуль скорости u (м/с) и температуру T ($^\circ\text{C}$); закрашенный прямоугольник указывает положение горелки

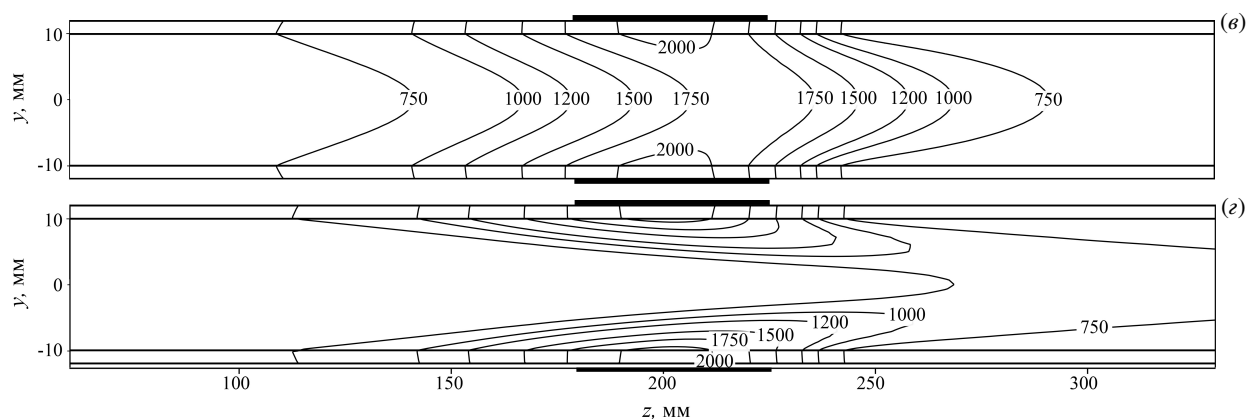


Рис. 10. Продолжение

Зависимость параметра Δl_u (Рис. 9а) от расхода Q и средней скорости прокачки газа u_0 представлена на рисунке 11а. С увеличением расхода Q величина Δl_u растет по степенному закону. Максимальная температура на оси трубки с ростом расхода уменьшается, так как снижается количество теплоты на единицу прокачиваемой массы газа за единицу времени. Протяженность зоны прогрева Δl_T (Рис. 9б) убывает с ростом расхода, что показано на рисунке 12. Следует подчеркнуть, что при расходах выше $Q = 0.62 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ температура в окрестности оси вращения трубки не достигает порогового значения 1200°C , необходимого для осуществления процесса MCVD.

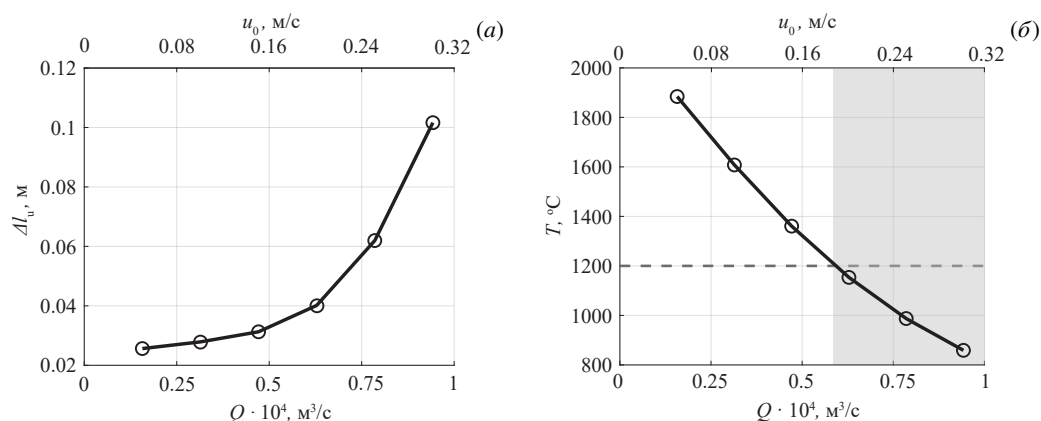


Рис. 11. Влияние расхода газа на параметр Δl_u (а) и максимальную температуру в окрестности оси вращения трубки (б): численные результаты (кружки); аппроксимация (линия); серым цветом выделена область расходов, в которой не достигается необходимая для процесса MCVD пороговая температура 1200°C (см. штриховую линию)

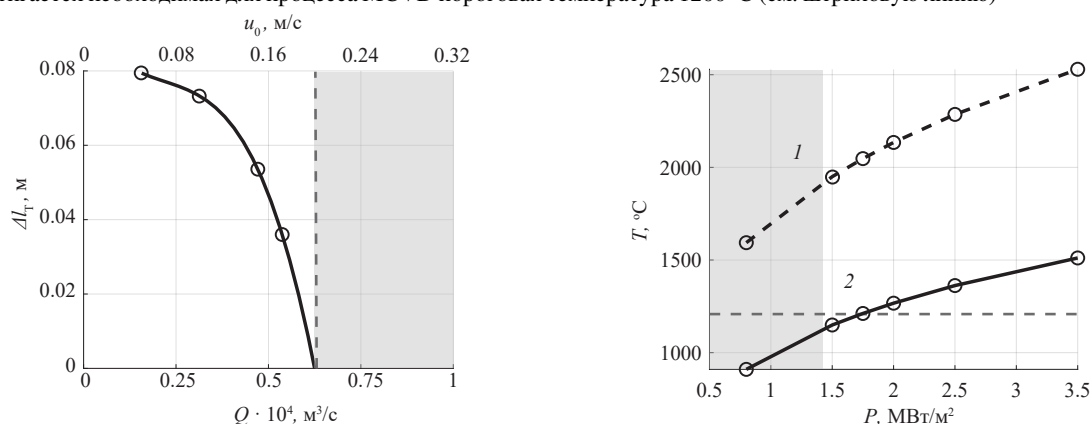


Рис. 12. Влияние расхода газа на параметр Δl_T : численные результаты (кружки); аппроксимация (линия); серым цветом выделена область расходов, в которой не достигается пороговая температура 1200°C ; штриховая линия соответствует разрыву зоны прогрева до 1200°C в окрестности оси вращения трубки

Рис. 13. Влияние подаваемой мощности на максимальные значения температуры на поверхности трубки (1) и на оси трубки в газе (2); серым цветом выделена область мощностей, при которых не достигается пороговая температура 1200°C (ей соответствует штриховая линия)

4.3. Влияние тепловой мощности

Процесс MCVD исследован при постоянном расходе газа $Q = 0.47 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ и разных значениях тепловой мощности горелки P , $\text{МВт}/\text{м}^2$: 0.8, 1.5, 1.75, 2.0, 2.5, 3.5. Температурные и скоростные поля аналогичны представленным на рисунке 9. Увеличение мощности повышает температуру в зоне действия горелки, но не меняет структуру температурных полей. Поля скорости также не зависят от тепловой мощности. Эти результаты говорят о том, что структура течения газа в трубке определяется преимущественно градиентами температуры, а не ее абсолютными значениями.

На рисунке 13 показаны зависимости максимальной температуры в газе и на внешней поверхности трубки от подводимой мощности. Увеличение тепловой мощности приводит к значительному росту значений указанных параметров. Следует отметить, что при подаваемой мощности менее $1.5 \text{ МВт}/\text{м}^2$ для выбранного набора параметров необходимая для реакции MCVD температура не достигается.

5. Выводы

В работе сформулирована и верифицирована математическая модель тепломассопереноса в процессе изготовления заготовок оптических волокон по технологии MCVD. Верификация на задаче прокачки газа через нагреваемую трубку подтвердила сходимость решения на сгущающейся сетке и соответствие расчетного распределения числа Нуссельта вдоль трубки известному аналитическому решению в случае однородного теплового потока на стенке. Верифицирован теплоперенос в поглощающей газовой среде с учетом излучения. Засвидетельствована адекватность математической модели путем сопоставления расчетного температурного поля на поверхности кварцевой трубки с экспериментальным, измеряемым пирометром. Вычисления на основе модели имеют отклонения от эксперимента не более 1.1%.

Рассчитаны поля скорости и температуры, которые демонстрируют сложное поведение газа внутри кварцевой трубки при вариациях технологических параметров — расхода газа и подводимой тепловой мощности. Выявлено, что увеличение тепловой мощности вызывает рост температуры газа в зоне действия горелки, но не сказывается на структуре течения. Определена минимальная мощность, необходимая для прогрева газа до рабочей температуры. Расход газа влияет на поле температуры: его повышение снижает температуру и изменяет форму зоны прогрева. Показано, что при расходе более $0.62 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ или подводимой тепловой мощности менее $1.5 \text{ МВт}/\text{м}^2$ газ прогревается недостаточно для надежного протекания процесса MCVD.

Адекватность математической модели и полученных с ее помощью результатов создает основу для продолжения исследований с учетом кинетики химических реакций, процессов переноса частиц, вызванного термофорезом, и их осаждения на внутреннюю поверхность кварцевой трубки, диффузионного переноса примесей в формирующихся слоях и последующего влияния перечисленных процессов на формирование оптического волокна.

Литература

1. Иванов Г.А., Первадчук В.П. Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон. Пермь: изд-во Пермского нац. исслед. политехнического ун-та, 2011. 171 с.
2. Nagel S.R., MacChesney J.B., Walker K.L. An Overview of the Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) Process and Performance // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1982. Vol. 30, no. 4. P. 305–322. DOI: 10.1109/TMTT.1982.1131071
3. Kim K.-S., Pratsinis S.E. Manufacture of optical waveguide preforms by modified chemical vapor deposition // AIChE Journal. 1988. Vol. 34, no. 6. P. 912–921. DOI: 10.1002/aic.690340603
4. Pal M., Sen R., Paul M.C., Bhadra S.K., Chatterjee S., Ghosal D., Dasgupta K. Investigation of the deposition of porous layers by the MCVD method for the preparation of rare-earth doped cores of optical fibres // Optics Communications. 2005. Vol. 254, no. 1–3. P. 88–95. DOI: 10.1016/j.optcom.2005.05.022
5. Первадчук В.П., Владимиров Д.Б., Дектярев Д.Н. Оптимальное управление тепловым источником воздействия в процессах парофазного осаждения // Проблемы управления. 2020. № 6. С. 71–80. DOI: 10.25728/ru.2020.6.7
6. Гнедовец А.Г., Фоминский В.Ю., Романов Р.И., Мацнев Н.П. Компьютерное моделирование роста тонкопленочных покрытий, сформированных импульсным лазерным осаждением при разных давлениях инертного газа // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 9. С. 3–9.
7. Liu W., Liu D., Zhang Y., Li B. Numerical investigation of particle size distribution, particle transport and deposition in a modified chemical vapor deposition process // Powder Technology. 2022. Vol. 407. 117616. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117616
8. Da Silva R.C., De Moraes P.J.D., Carvalho A., De Rossi W., Motta C.C. Numerical simulation on modified chemical vapor deposition (MCVD) thermal flow field // 2022 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC). 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/SBFotonIOPC54450.2022.9993108
9. Walker K.L., Geyling F.T., Nagel S.R. Thermophoretic Deposition of Small Particles in the Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) Process // Journal of the American Ceramic Society. 1980. Vol. 63. P. 552–558. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1980.tb10763.x
10. Коробейников А.Г., Гатчин Ю.А., Дукельский К.В., Тер-Нерсисянц Е.В. Проблемы производства высокопрочного оптического волокна // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. Т. 13, № 2. С. 18–23.

11. Богатырев В.А., Бубнов М.М., Вечканов Н.Н., Гурьянова А.Н., Дианова Е.М., Конова А.С., Лаврищева С.В., Лаптев А.Ю. Высокопрочные волоконные световоды, изготовленные методом химического осаждения из газовой фазы // Квантовая электроника. 1982. Т. 9, № 7. С. 1506–1509.
12. Утепбергенов И.Т., Юсупова Г.М. Проблемы применения многомодовых оптических волокон в современных волоконно-оптических системах передачи // Вестник Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. 2010. № 3. С. 119–122.
13. Cheung C.K.W., Fletcher D.F., Barton G.W., McNamara P. Simulation of particle transport and deposition in the modified chemical vapor deposition process // Journal of Non-Crystalline Solids. 2009. Vol. 355. P. 327–334. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2008.11.009
14. Тюрин М.П., Бородин Е.С. Гидрогазодинамика. Практикум. Часть 2. М.: РГУ им. А. Н. Косыгина, 2018. 147 с.
15. Фокеева Л.Х. Гидравлика и нефтегазовая гидромеханика. Часть 2. Гидродинамика. Казань: Казан. ун-т, 2017. 85 с.
16. Александров Д.В., Зубарев А.Ю., Исакова Л.Ю. Введение в гидродинамику. Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 2012. 112 с.
17. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
18. Бояришинов М.Г., Балабанов Д.С. Вычислительное моделирование движения сжимаемой среды, генерируемой точечным источником // Вычислительная механика сплошных сред. 2010. Т. 3, № 3. С. 18–31. DOI: 10.7242/1999-6691/2010.3.3.24
19. Рогожский С.А., Аксенов А.А., Жлуктов С.В., Осипов С.Л., Сазонова М.Л., Фадеев И.Д., Шепелев С.Ф., Шмелев В.В. Разработка модели турбулентного теплопереноса для жидкометаллического натриевого теплоносителя и ее верификация // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7, № 3. С. 306–316. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.3.30
20. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
21. Bianco N., Manca O., Nardini S., Tamburrino S. A Numerical Model for Transient Heat Conduction in Semi-Infinite Solids Irradiated by a Moving Heat Source // Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference. Hannover, 2008. P. 1–7.
22. Park K.S., Choi M. Conjugate heat transfer and particle deposition in the modified chemical vapor deposition process: Effects of torch speed and solid layer // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1994. Vol. 37, no. 11. P. 1593–1603. DOI: 10.1016/0017-9310(94)90175-9
23. Владимиров Д.Б., Хуснуллина М.Х. Моделирование нагрева кварцевой заготовки в процессе MCVD с использованием ComsolMultiphysics // Наука и бизнес: пути развития. 2014. № 8. С. 92–96.
24. Туричин Г.А., Лопота В.А., Абдурахманов А.А., Сысоев В.К. Математическое моделирование нагрева и испарения кварцевого стекла при лазерном синтезе нанопорошков // Физика и химия обработки материалов. 2006. № 5. С. 49–54.
25. Первадчук В.П., Владимиров Д.Б., Дектярев Д.Н., Пестерев А.А. Моделирование нагрева кварцевых труб подвижным источником воздействия для решения задачи управления процессом MCVD // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 9–2. С. 76–82. DOI: 10.18454/IRJ.2016.51.092
26. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972. 721 с.
27. Никулин И.Л. Математическое моделирование поведения металлических расплавов в электромагнитных полях и очистки их поверхности от неметаллических включений: дис. . . . канд. / Никулин И. Л. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2023. 322 с.
28. Sun Y., Zheng S., Jiang B., Tang J., Liu F. One-dimensional P1 method for gas radiation heat transfer in spherical geometry // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019. Vol. 145. 118777. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118777
29. Карасев Т.О., Теймуразов А.С., Перминов А.В. Численное исследование теплоотдачи стенки титанового реактора при воздушном охлаждении // Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13, № 4. С. 424–436. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.4.33
30. Карякина Е.Д. Разработка технологического процесса транспортировки сжиженного природного газа по полимерным трубопроводам: дис. . . . канд. / Карякина Е. Д. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2023. 120 с.
31. Казанцева Н.С., Зиннатуллин Н.Х. Конвективный теплообмен в круглой трубе // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 3. С. 77–80.
32. Bejan A. Convection heat transfer. John Wiley & Sons, Inc., 2013. 704 p.
33. Cintolesi C., Nilsson H., Petronio A., Armenio V. Numerical simulation of conjugate heat transfer and surface radiative heat transfer using the P1 thermal radiation model: Parametric study in benchmark cases // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017. Vol. 107. P. 956–971. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.006

Сведения об авторах:

Кустов Дмитрий Александрович (корр.), асп., Пермская научно-производственная приборостроительная компания (ПНППК), 614002, г. Пермь, ул. 25 Октября, д. 106; e-mail: dakustov@pstu.ru; ORCID: 0009-0000-6034-0355

Никулин Илларион Леонидович, дтн, проф., Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; e-mail: nil@pstu.ru; ORCID: 0000-0002-8496-7942

Семенов Тимофей Эдуардович, студ., ПНИПУ; e-mail: timof3isem@yandex.ru; ORCID: 0009-0006-3718-831X

Research article

Mathematical modeling of heat and mass transfer in gas and quartz tube during the MCVD process

D.A. Kustov^{1,2}, I.L. Nikulin¹, T.E. Semenov^{1,2}

¹ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

² Perm Research and Production Instrumentation Company, Perm, Russian Federation

The article investigates the processes occurring in the manufacture of optical fiber preforms, in particular, the process of heat and mass transfer during alloying of quartz tubular blanks by the method of modified chemical vapor deposition (MCVD). To evaluate heat and mass transfer in a quartz tube and a pumped gas, a mathematical model has been developed. It takes into account the inhomogeneous heating of the tube by means of a gas burner, free convection and radiation from the outer surface of the tube, as well as forced convection and absorption of radiation in the pumped gas. The description of heat and mass transfer is based on the Navier-Stokes equations, and the equations for heat energy transfer with consideration of radiation and continuity for a compressible medium. The model takes into account the temperature dependences of the thermophysical properties of the pumped gas and the quartz tube. The problem is solved in the frame of reference associated with a rotating tube. The numerical implementation of the model is performed in a three-dimensional formulation using the COMSOL Multiphysics software package. The verification of the model is carried out using the problems with known solutions, such as pumping gas through a uniformly heated tube, thermal conductivity, and radiation in a cavity filled with absorbing gas. The adequacy of the model is shown by comparing the calculated and experimental profiles of the tube surface temperature generated during the technological process. The error of modeling the temperature field is no more than 1.1%. The results of modeling the effect of the flow rate of the pumped gas and the supplied heat rate on the temperature and velocity fields in the tube and gas are presented. It has been shown that the supplied power input affects the absolute values of temperature, but does not change the structure of the velocity and temperature fields. The gas flow rate affects both the absolute values and the structure of the fields. The boundaries of the parameters providing the required conditions of the MCVD process are defined. The ways of refining the mathematical model are outlined.

Keywords: vapor deposition, forced convection, free convection, thermal radiation, model verification

Received: 29.08.2025 / *Published online:* 05.08.2026

References

1. Ivanov G.A., Pervadchuk V.P. *Tekhnologiya proizvodstva i svoystva kvartsevykh opticheskikh volokon*. Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2011. 171 p.
2. Nagel S.R., MacChesney J.B., Walker K.L. An Overview of the Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) Process and Performance. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1982. Vol. 30, no. 4. P. 305–322. DOI: 10.1109/TMTT.1982.1131071
3. Kim K.-S., Pratsinis S.E. Manufacture of optical waveguide preforms by modified chemical vapor deposition. *AIChE Journal*. 1988. Vol. 34, no. 6. P. 912–921. DOI: 10.1002/aic.690340603
4. Pal M., Sen R., Paul M.C., Bhadra S.K., Chatterjee S., Ghosal D., Dasgupta K. Investigation of the deposition of porous layers by the MCVD method for the preparation of rare-earth doped cores of optical fibres. *Optics Communications*. 2005. Vol. 254, no. 1–3. P. 88–95. DOI: 10.1016/j.optcom.2005.05.022
5. Pervadchuk V.P., Vladimirova D.B., Dektyarev D.N. Optimal control of the thermal source of exposure in the processes of vapor deposition. *Control Sciences*. 2020. No. 6. P. 71–80. DOI: 10.25728/ps.2020.6.7
6. Gnedovets A.G., Fominski V.Y., Romanov R.I., Matsnev N.P. Computer modeling of thin film coatings growth during pulsed laser deposition at various pressures of inert gas. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2007. No. 9. P. 3–9.
7. Liu W., Liu D., Zhang Y., Li B. Numerical investigation of particle size distribution, particle transport and deposition in a modified chemical vapor deposition process. *Powder Technology*. 2022. Vol. 407. 117616. DOI: 10.1016/j.powtec.2022.117616
8. Da Silva R.C., De Moraes P.J.D., Carvalho A., De Rossi W., Motta C.C. Numerical simulation on modified chemical vapor deposition (MCVD) thermal flow field. 2022 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC). 2022. P. 1–5. DOI: 10.1109/SBFotonIOPC54450.2022.9993108
9. Walker K.L., Geysling F.T., Nagel S.R. Thermophoretic Deposition of Small Particles in the Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) Process. *Journal of the American Ceramic Society*. 1980. Vol. 63. P. 552–558. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1980.tb10763.x
10. Korobeynikov A., Gatchin Y., Dukel'skiy K., Ter-Nersisyan E. Aspects of high-strength optical fiber manufacture. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2013. Vol. 13, no. 2. P. 18–23.

11. Bogatyrev V.A., Bubnov M.M., Vechkanov N.N., Gur'yanov A.N., Dianov E.M., Konov A.S., Lavrishchev S.V., Laptev A.Y. High-strength fiber waveguides made by chemical vapor deposition method. *Soviet Journal of Quantum Electronics*. 1982. Vol. 12. P. 965–967. DOI: 10.1070/QE1982v012n07ABEH005722
12. Utebergenov I.T., Yusupova G.M. Problemy primeneniya mnogomodovykh opticheskikh volokon v sovremennykh volokonno-opticheskikh sistemakh peredachi. *Bulletin of KazATC*. 2010. No. 3. P. 119–122.
13. Cheung C.K.W., Fletcher D.F., Barton G.W., McNamara P. Simulation of particle transport and deposition in the modified chemical vapor deposition process. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2009. Vol. 355. P. 327–334. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2008.11.009
14. Tyurin M.P., Borodina E.S. *Gidrogazodinamika. Praktikum. Part 2*. Moscow: A.N. Kosygin Russian State University, 2018. 147 p.
15. Fokeyeva L.K. *Gidravlika i neftegazovaya gidromekhanika. Chast' 2. Gidrodinamika*. Kazan: Kazan University, 2017. 85 p.
16. Aleksandrov D.V., Zubarev A.Yu., Iskakova L.Yu. *Vvedeniye v gidrodinamiku*. Yekaterinburg: Ural University, 2012. 112 p.
17. Landau L.D., Lifshitz E.M. *Fluid Mechanics*. Butterworth-Heinemann, 1987. 560 p.
18. Boyarshinov M.G., Balabanov D.S. Computational simulation of dispersion of a compressible medium emitted by a local source. *Computational Continuum Mechanics*. 2010. Vol. 3, no. 3. P. 18–31. DOI: 10.7242/1999-6691/2010.3.3.24
19. Rogozhkin S.A., Aksenov A.A., Zhlukov S.V., Osipov S.L., Sazonova M.L., Fadeev I.D., Shepelev S.F., Shmelev V.V. Development and verification of a turbulent heat transport model for sodium-based liquid metal coolants. *Computational Continuum Mechanics*. 2014. Vol. 7, no. 3. P. 306–316. DOI: 10.7242/1999-6691/2014.7.3.30
20. Kutateladze S.S. *Teploperedacha i gidrodinamicheskoye soprotivleniye: Spravochnoye posobiye*. Moscow: Energoatomizdat, 1990. 367 p.
21. Bianco N., Manca O., Nardini S., Tamburrino S. A Numerical Model for Transient Heat Conduction in Semi-Infinite Solids Irradiated by a Moving Heat Source. Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference. 2008. P. 1–7.
22. Park K.S., Choi M. Conjugate heat transfer and particle deposition in the modified chemical vapor deposition process: Effects of torch speed and solid layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1994. Vol. 37, no. 11. P. 1593–1603. DOI: 10.1016/0017-9310(94)90175-9
23. Vladimirova D.B., Khusnullina M.K. Simulation of heating quartz preform in mcvd process by Comsol Multiphysics. *Science and Business: Ways of Development*. 2014. No. 8. P. 92–96.
24. Turichin G.A., Lopota V.A., Abdurakhmanov A.A., Sysoyev V.K. Matematicheskoye modelirovaniye nagreva i ispareniya kvartsevoogo stekla pri lazernom sinteze nanoporoshkov. *Physics and Chemistry of Materials Treatment*. 2006. No. 5. P. 49–54.
25. Pervadchuk V.P., Vladimirova D.B., Dektyarev D.N., Pesterev A.A. Simulation of heating quartz tubes by moving heat source for solving problem of process control MVCD. *International Research Journal*. 2016. No. 9–2. P. 76–82. DOI: 10.18454/IRJ.2016.51.092
26. Vargaftik N.B. *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey*. Moscow: Nauka, 1972. 721 p.
27. Nikulin I.L. Mathematical modeling of the behavior of metallic melts in electromagnetic fields and cleaning of their surface from non-metallic inclusions: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences: PhD thesis / Nikulin I. L. Perm: Perm National Research Polytechnic University, 2023. 322 p.
28. Sun Y., Zheng S., Jiang B., Tang J., Liu F. One-dimensional P1 method for gas radiation heat transfer in spherical geometry. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2019. Vol. 145. 118777. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118777
29. Karasev T.O., Teimurazov A.S., Perminov A.V. Numerical study of heat transfer coefficient of titanium reactor wall at air cooling. *Computational Continuum Mechanics*. 2020. Vol. 13, no. 4. P. 424–436. DOI: 10.7242/1999-6691/2020.13.4.33
30. Karyakina E.D. Development of a technological process for transporting liquefied natural gas through polymer pipelines: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: PhD thesis / Karyakina E. D. St. Petersburg: Saint Petersburg Mining University, 2023. 120 p.
31. Kazantseva N.S., Zinnatullin N.Kh. Konvektivnyy teploobmen v krugloy trube. *Herald of Kazan Technological University*. 2014. Vol. 17, no. 3. P. 77–80.
32. Bejan A. *Convection heat transfer*. John Wiley & Sons, Inc., 2013. 704 p.
33. Cintolesi C., Nilsson H., Petronio A., Armenio V. Numerical simulation of conjugate heat transfer and surface radiative heat transfer using the P1 thermal radiation model: Parametric study in benchmark cases. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 107. P. 956–971. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.006