



УДК 536.24 : 544.77 : 66.081

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2\(23\).2026.31](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2(23).2026.31)**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ БЕЗРАЗМЕРНЫЙ АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКОГО И ПРОТОЧНОГО РЕЖИМОВ ТЕРМОАКТИВИРУЕМОГО ЗОЛЬ-ГЕЛЬ ОСАЖДЕНИЯ КРЕМНЕЗЁМА В ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МИКРОКАНАЛАХ****А. А. Мещеряков*, Ф. К. Шабиев**

ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет», Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6

*e-mail: meshcheryakov.a.a@outlook.com

Аннотация. Создание лабораторных моделей пористых сред нефтяных коллекторов требует покрытия стенок фотополимерных микроканалов кремнезёмом методом золь-гель синтеза; в статическом режиме осаждение крайне неравномерно, что ограничивает применимость метода. До настоящего времени отсутствовал систематический безразмерный анализ, объединяющий статический и проточный режимы в единой постановке. Целью работы является сравнение режимов на основе анализа безразмерных критериев подобия, построение режимной карты в координатах (Da_z, Pe_T) и определение оптимального окна расходов золь-геля. Методом является аналитический безразмерный анализ сопряжённой задачи тепломассопереноса и поликонденсации тетраэтоксисилана (ТЭОС) в осесимметричном микроканале радиусом $R = 250$ мкм и длиной $L = 30$ мм при температуре стенки $T_{wall} = 60$ °С. Установлено, что в статическом режиме число Рэлея $Ra \approx 61 \ll Ra_c = 1708$ — естественная конвекция геометрически подавлена; характерная длина диффузионного истощения мономера составляет $L_{dep} \approx 1,0$ мм, что концентрирует более 90 % массы осадка в первых 5–7 мм канала. В проточном режиме управляющими параметрами становятся осевое число Дамкёлера Da_z и тепловое число Пекле Pe_T . Оптимальное окно расходов $Q \in [0,1; 2]$ мкл/мин обеспечивает одновременное выполнение $Da_z < 1$ и $Pe_T < 1$, то есть равномерность осаждения по длине канала и полноту теплового активирования реакции. Переход от статического к проточному режиму принципиально меняет лимитирующий механизм — от диффузионного истощения к конвективному обновлению реагента.

Ключевые слова: *тепломассоперенос; золь-гель синтез; кремнезём; микроканал; число Дамкёлера; число Пекле; безразмерный анализ; фотополимер; режимная карта; осаждение покрытий.*

UDC 536.24 : 544.77 : 66.081

COMPARATIVE DIMENSIONLESS ANALYSIS OF STATIC AND FLOW-THROUGH REGIMES OF THERMALLY ACTIVATED SOL-GEL SiO_2 DEPOSITION IN PHOTOPOLYMER MICROCHANNELS**A. A. Meshcheryakov*, F. K. Shabiev***

University of Tyumen, 6 Volodarskogo St., Tyumen, 625003, Russia

*e-mail: meshcheryakov.a.a@outlook.com

Abstract. *Fabrication of laboratory models of porous media of oil reservoirs requires coating the walls of photopolymer microchannels with silica via sol-gel synthesis; in the static regime, deposition is highly non-uniform, which limits the applicability of the method. A systematic dimensionless analysis unifying the static and flow-through regimes within a single formulation has been lacking. The aim of this work is to compare the two regimes on the basis of dimensionless similarity criteria, to construct a regime map in the (Da_z, Pe_T) coordinates and to determine the optimal flow-rate window. The method employed is an analytical dimensionless analysis of the coupled heat-mass transfer and tetraethyl orthosilicate (TEOS) polycondensation problem in an*



axisymmetric microchannel of radius $R = 250 \mu\text{m}$ and length $L = 30 \text{ mm}$ at a wall temperature $T_{\text{wall}} = 60^\circ\text{C}$. In the static regime, the Rayleigh number $Ra \approx 61 \ll Ra_c = 1708$ — natural convection is geometrically suppressed; the characteristic monomer depletion length is $L_{\text{dep}} \approx 1.0 \text{ mm}$, which concentrates more than 90 % of the deposit mass within the first 5–7 mm of the channel. In the flow-through regime, the axial Damköhler number Da_z and the thermal Péclet number Pe_T become the controlling parameters. The optimal flow-rate window $Q \in [0.1; 2] \mu\text{L/min}$ simultaneously satisfies $Da_z < 1$ and $Pe_T < 1$, ensuring deposition uniformity along the channel and complete thermal activation of the reaction. The transition from the static to the flow-through regime fundamentally changes the limiting mechanism — from diffusion-driven depletion to convective renewal of the reagent.

Key words: heat and mass transfer; sol–gel synthesis; silica; microchannel; Damköhler number; Péclet number; dimensional analysis; photopolymer; regime map; coating deposition.

Введение

Воспроизведение тепломассопереноса в пористых средах нефтяных коллекторов в лабораторных условиях требует создания моделей, корректно отражающих как геометрию порового пространства, так и поверхностные свойства горной породы — гидрофильность, шероховатость и химический состав. Такие модели — искусственные керны, изготовленные методами аддитивного производства, — позволяют валидировать численные расчёты процессов многофазной фильтрации, капиллярного и неизотермического переноса в условиях, не достижимых при прямом эксперименте на природных образцах [1].

Современные стереолитографические технологии (MSLA) позволяют изготавливать микроканальные структуры с минимальной поперечной шириной около 20 мкм при субмикронном осевом разрешении. Поровое пространство реальных коллекторов, однако, характеризуется размерами на порядок меньшими — до 1 мкм и менее. Прямое уменьшение печатной геометрии ограничено физическим разрешением оптической литографии и реологическими свойствами фотополимерной смолы.

Альтернативный путь — многоцикловое уменьшение эффективного радиуса канала послойным осаждением кремнезёма (SiO_2) на стенки. Метод золь-гель синтеза из тетраэтоксисилана (ТЭОС) при кислотном катализе формирует за один цикл слой толщиной 50–500 нм [2]; при повторении 10–20 циклов достигнимо равномерное сужение от 20 мкм до 1–2 мкм. Помимо геометрического сужения, кремнезёмное покрытие придаёт стенке гидрофильность (краевой угол смачивания менее 10°) и приближает её химический состав к кварцу — главной порообразующей фазе песчаников.

Ключевым условием успеха является прочное закрепление покрытия. В работе [1] экспериментально подтверждено, что при $T_{\text{wall}} = 60^\circ\text{C}$ на границе SiO_2 /полимер формируется ковалентная связь Si-O-C , обеспечивающая адгезию, устойчивую к промывке и многократному термоциклированию. Температурный диапазон осаждения 50–70 $^\circ\text{C}$ принят как технологический.

В статическом режиме, когда золь предварительно загружается в канал и нагревается в покое, осаждение оказывается резко неравномерным. Экспериментально и теоретически показано, что более 90 % массы SiO_2 формируется в первых 5–7 мм из 30 мм длины канала; оставшаяся часть стенки остаётся практически непокрытой. Качественное объяснение основано на представлении о диффузионно-лимитированном истощении пристеночного мономерного слоя, однако систематический безразмерный анализ, объединяющий статический и проточный режимы в единой постановке, в литературе отсутствует.

Цель настоящей работы — провести сравнительный безразмерный анализ статического и проточного режимов термоактивируемого осаждения SiO_2 в фотополимерном микроканале $R = 250 \text{ мкм}$, $L = 30 \text{ мм}$. Конкретные задачи: (а) сформулировать сопряжённую систему уравнений тепломассопереноса с пристеночной и объёмной реакциями; (б) выделить определяющие безразмерные критерии для двух предельных конфигураций; (в) построить режимную карту в координатах (Da_z, Pe_T) и определить окно расходов, обеспечивающее

равномерное покрытие по всей длине канала. Работа относится к математическому моделированию совместного тепло- и массопереноса в химически реагирующих системах и соответствует направлению «разработка физических механизмов и математических моделей в энергетике».

Новизна работы состоит в следующем: (а) впервые проведён сравнительный безразмерный анализ статического и проточного режимов осаждения SiO_2 в единой формулировке; (б) впервые систематически исследована система на фотополимерной подложке, теплопроводность которой существенно ниже, чем у стекла, PDMS и кремния; (в) построена режимная карта в координатах (Da_z, Pe_T) , позволяющая управлять равномерностью покрытия выбором расхода.

Методы и материалы

Рассматривается осесимметричный цилиндрический микроканал, образованный фотополимерной смолой (ELEGOO Standard Resin), напечатанной методом MSLA. Золь готовят из ТЭОС в этаноле с водой и кислотным катализатором (HCl) в мольных соотношениях ТЭОС : EtOH : H_2O : HCl = 1 : 8 : 4 : 0,24 с предварительным старением 24 ч при 25 °С. Геометрические и физико-химические параметры задачи сведены в табл. 1.

Таблица 1.

Параметры задачи

Table 1.

Problem parameters

Параметр	Обозначение	Значение
Радиус канала	R	250 мкм
Длина канала	L	30 мм
Температура стенки	T_{wall}	333 К (60 °С)
Температура входа золя	T_{in}	298 К (25 °С)
Плотность золя	ρ	950 кг/м ³
Удельная теплоёмкость	c_p	3700 Дж/(кг·К)
Теплопроводность золя	λ	0,50 Вт/(м·К)
Кинематическая вязкость	ν	$2 \cdot 10^{-6}$ м ² /с
Температуропроводность	$a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$ м ² /с
Коэф. диффузии Si–ОН	D	$3 \cdot 10^{-10}$ м ² /с
Энергия активации	E_a	48 кДж/моль
Предэкспоненциальный множитель	A	$5 \cdot 10^5$ м ³ /(моль·с)
Конст. скорости гелирования (60 °С)	k_{gel}	$3 \cdot 10^{-4}$ с ⁻¹
Конст. поверхностного осаждения	k_s	$10^{-8} - 10^{-6}$ м/с
Гель-точка	α_{gel}	≈ 0,65
Коэф. объёмного расширения	β	$4 \cdot 10^{-4}$ К ⁻¹
Диапазон расходов	Q	0,01 – 100 мкл/мин
Средняя скорость	$u^0 = \frac{Q}{\pi R^2}$	0,85 мкм/с – 8,5 мм/с

Система уравнений в цилиндрических координатах (r, z) при осевой симметрии включает уравнение неразрывности (1), уравнения Навье–Стокса в приближении Буссинеска (2), уравнение энергии с источником, обусловленным экзотермической поликонденсацией (3), уравнение переноса мономерных силанольных групп Si–ОН (4), кинетику конверсии по закону Аррениуса (5), реологическое замыкание для эффективной вязкости (6) и кинетику поверхностного осаждения (7).



$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u \right) = -\nabla p + \nabla \cdot [\eta(\alpha)\nabla u] + \rho_0 g \beta (T - T_0) e_z \quad (2)$$

$$\rho_0 c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T \right) = \lambda \nabla^2 T + Q_{rxn} W \quad (3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \cdot \nabla c = D \nabla^2 c - R_{rxn} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = k(T)(1 - \alpha)^n, \quad k(T) = A \exp \left(-\frac{E_a}{R_g T} \right) \quad (5)$$

$$\eta(\alpha) = \eta_0 \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_{gel}} \right)^{-n} \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} = k_s c \left(1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_{max}} \right), \quad \delta = \frac{\Gamma M_{SiO_2}}{\rho_{SiO_2}} \quad (7)$$

Граничные условия. На стенке ($r = R$) выполняется условие прилипания $u = 0$; температурный режим $T = T_{wall}$; пристеночный массообмен описывается равенством $-D \cdot \frac{\partial c}{\partial r} |_{r=R} = k_s c \left(1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_{max}} \right)$ а оси ($r = 0$) задаются условия осевой симметрии: $\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\partial c}{\partial r} = 0, u_r = 0$. На входе ($z = 0$) — равномерный профиль $u_z = u_0 = Q/(\pi R^2), T = T_{in}, c = c_0, \alpha = \alpha_0 \in [0,05; 0,15]$. На выходе ($z = L$) принимается условие Неймана $\frac{\partial(\cdot)}{\partial z} = 0$ для всех переменных.

Метод исследования — аналитический безразмерный анализ системы (1)–(7) с введением характерных масштабов: R (поперечный), L (продольный), u_0 (скорость), $\Delta T = T_{wall} - T_{in}$ (температура), c_0 (концентрация). При обезразмеривании выделены определяющие критерии: $Ra, Re, Pe_T, Pe_m, Sc, Da_r, Da_z, Fo$. Анализ проведён для двух предельных конфигураций: статический режим ($u_0 = 0$, золь в покое) и проточный режим ($u_0 > 0$, шприцевая прокачка). Численные оценки выполнены для значений параметров табл. 1; для константы поверхностного осаждения принято верхнее значение указанного диапазона $k_s = 10^{-6}$ м/с.

Результаты

3.1. Статический режим ($u_0 = 0$). В статическом режиме конвективные члены в (2)–(4) обращаются в нуль; единственными механизмами радиального переноса остаются молекулярная диффузия и тепловая свободная конвекция. Возможность развития конвекции оценивается числом Рэлея, построенным на диаметре канала $d = 2R = 500$ мкм, формула (8).

$$Ra = \frac{g \beta \Delta T d^3}{\nu \alpha} \quad (8)$$

Подстановка $g = 9,81$ м/с², $\beta = 4 \cdot 10^{-4}$ К⁻¹, $\Delta T = 35$ К, $d^3 = 1,25 \cdot 10^{-10}$ м³, произведения $\nu \cdot \alpha = 2,8 \cdot 10^{-13}$ м⁴/с² даёт $Ra \approx 61 \ll Ra_c = 1708$. Это значение существенно ниже критического для развития конвективных ячеек Релея–Бенара и ниже порога устойчивости при боковом нагреве. Естественная конвекция геометрически подавлена; перенос мономера к стенке полностью контролируется молекулярной диффузией с $D = 3 \cdot 10^{-10}$ м²/с.

Сопоставление радиальной диффузии и кинетики гелирования при $T_{wall} = 60$ °С даёт радиальное число Дамкёлера, формула (9).

$$Da_r = \frac{k_{gel} R^2}{D} \approx 6 \cdot 10^{-2} \ll 1 \quad (9)$$



Характерное время радиальной диффузии $R^2/D \approx 0,2$ с многократно короче времени гелирования $\frac{1}{k_{gel}} \approx 3,3 \cdot 10^3$ с. Радиальный профиль концентрации квазиоднороден, реакция протекает равномерно по сечению.

Принципиально иначе ведёт себя осевое распределение. Конкуренция осевой диффузии и расхода мономера в гелирующемся объёме задаёт характерную длину диффузионного истощения, формула (10).

$$L_{dep} = \sqrt{\frac{D}{k_{gel}}} \approx 1,0 \text{ мм} \quad (10)$$

С учётом неоднородности прогрева у входа оценка корректируется до $L_{dep} \in [1,0; 1,3]$ мм. При $L = 30$ мм отношение $\frac{L}{L_{dep}} \approx 23$, что означает: более 90 % массы SiO_2 осаждается в первых 5–7 мм канала, а оставшиеся 23–25 мм поверхности остаются практически непокрытыми.

Характерное время прогрева золя по радиусу оценивается через число Фурье $Fo = \alpha t - R^2$; выход на $Fo \sim 0,5$ соответствует $t \sim R^2/(2\alpha) \approx 0,2$ с. С учётом теплоизолирующих свойств фотополимерной стенки ($\lambda_{wall} \approx 0,2$ Вт/(м·К)) реальное время прогрева возрастает на 1–2 порядка, но остаётся пренебрежимо малым по сравнению с временем гелирования. Равномерное покрытие по длине $L = 30$ мм в статическом режиме при $T_{wall} = 60$ °С принципиально невозможно вследствие диффузионного истощения мономера; типичная морфология — резкая зона осаждения у входа с экспоненциальным затуханием толщины $\delta(z)$.

3.2. Проточный режим ($u_0 > 0$). Введение прокачки Q меняет лимитирующий механизм: концентрация мономера у стенки поддерживается осевым конвективным потоком. Определяющие критерии оцениваются в диапазоне $Q \in [0,01; 100]$ мкл/мин, что соответствует $u_0 \in [8,5 \cdot 10^{-7}; 8,5 \cdot 10^{-3}]$ м/с.

Число Рейнольдса $Re = u_0(2R)/\nu$ во всём диапазоне расходов остаётся менее $2,1 \ll 2300$ — течение строго ламинарное, в большинстве случаев стоксово; в развитой области профиль скорости пуазейлевский.

Тепловое число Пекле, формула (11).

$$Pe_T = \frac{u_0 R}{a} \quad (11)$$

При $Q = 1$ мкл/мин $u_0 = 8,5 \cdot 10^{-5}$ м/с и $Pe_T \approx 0,15$; при $Q = 100$ мкл/мин $Pe_T \approx 15$. Длина теплового входного участка $L_T \sim Pe_T \cdot R - 4$ при $Q = 1$ мкл/мин не превышает 10 мкм $\ll R$ — тепловой пограничный слой захватывает всё сечение практически за входом, центральные слои золя выходят на T_{wall} . Это режим полного теплового активирования реакции. При $Q = 100$ мкл/мин $L_T \approx 0,9$ мм — значительная часть канала функционирует как тепловой входной участок, центральные слои не успевают прогреться, скорость реакции по сечению неоднородна.

Массовое число Пекле, формула (12).

$$Pe_m = \frac{u_0 R}{D} \quad (12)$$

При $Q = 1$ мкл/мин $Pe_m \approx 71$; при $Q = 100$ мкл/мин $Pe_m \approx 7,1 \cdot 10^3$. Во всём диапазоне $Pe_m \gg 1$ — осевая конвекция многократно доминирует над осевой диффузией. Важное следствие: длина диффузионного истощения L_{dep} , ограничивавшая зону осаждения в статике, утрачивает физический смысл; концентрация $c(z)$ определяется не диффузионным балансом, а соотношением конвективного подвода и пристеночного потребления.



Число Шмидта, формула (13).

$$Sc = \frac{\nu}{D} \approx 6,7 \cdot 10^3 \quad (13)$$

Высокое Sc означает, что массовый пограничный слой существенно тоньше теплового ($Pr = \frac{\nu}{\alpha} \approx 14$). Толщина массового погранслоя $\frac{\delta_m}{R} \sim Pe_m^{-1/3}$; при $Q = 1$ мкл/мин $\delta_m \approx 60$ мкм — около четверти радиуса канала.

Осевое число Дамкёлера — ключевой управляющий параметр в проточном режиме. Поскольку определяющим механизмом неравномерности является конкуренция времени пребывания $\tau_{res} = \frac{L}{u^0}$ и характерного времени реакции $\frac{1}{k_{gel}}$, в качестве физически содержательного определения принимается формула (14).

$$Da_z = \frac{k_{gel}L}{u_0} \quad (14)$$

Значения Da_z для исследуемого диапазона расходов: $Da_z \approx 1,1 \cdot 10^{-3}$ при $Q = 100$ мкл/мин; 0,11 при $Q = 10$ мкл/мин; 1,1 при $Q = 0,1$ мкл/мин; 10,6 при $Q = 0,01$ мкл/мин. Условие $Da_z < 1$ означает, что время пребывания короче характерного времени гелирования: концентрация мономера на выходе $\frac{c(L)}{c^0} \approx \exp(-Da_z) > 0,37$, осаждение практически равномерно по длине. При $Da_z > 1$ концентрация резко падает, осаждение концентрируется у входа — режим, эквивалентный статическому. Граничное значение $Da_z = 1$ при $L = 30$ мм и $k_{gel} = 3 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1}$ соответствует $u^0 * = k_{gel}L = 9 \cdot \frac{10^{-6} \text{м}}{\text{с}}$, или $Q^* \approx 0,11$ мкл/мин. Поверхностный аналог $Da_z^{(s)} = k_s L - u^0$ при $k_s = \frac{10^{-6} \text{м}}{\text{с}}$ во всём исследуемом диапазоне Q остаётся существенно меньше единицы и контролирует не равномерность, а суммарную эффективность осаждения за один проход.

3.3. *Сводная характеристика режимов.* Численные оценки безразмерных критериев для обоих режимов при характерном расходе $Q = 1$ мкл/мин сведены в табл. 2.

Таблица 2.

Сводка безразмерных критериев для двух режимов

Table 2.

Summary of dimensionless criteria for the two regimes

Критерий	Статика	Проток ($Q = 1$ мкл/мин)	Физический смысл
Ra	≈ 61	—	Конвекция подавлена
Re	0	$\sim 2 \cdot 10^{-2}$	Стоксово ламинарное течение
Pe_T	0	0,15	Полное тепловое активирование
Pe_m	0	71	Конвективное обновление мономера
Da_r	$6 \cdot 10^{-2}$	$\sim 10^{-2}$	Однородная радиальная конверсия
Da_z	$\rightarrow \infty$	0,11	Слабое осевое истощение
Sc	—	$6,7 \cdot 10^3$	Тонкий массовый погранслой
$\frac{L_{dep}}{L}$	0,04–0,07	теряет смысл	Зона обеднения
$\delta(z)$	< 20 % длины	> 90 % при $Da_z < 1$	Ключевой результат

3.4. *Режимная карта (Da_z, Pe_T).* Центральным результатом является режимная карта в логарифмических координатах (Da_z, Pe_T), на которой линии $Da_z = 1$ и $Pe_T = 1$ разбивают пространство параметров на четыре области (рис. 1). Область I ($Da_z < 1, Pe_T < 1$) — оптимальный режим: равномерное осевое покрытие сочетается с полным тепловым активированием; для исследуемой системы оптимальное окно $Q \in [0,1; 7]$ мкл/мин, с



двукратным запасом — $Q \in [0,5; 2]$ мкл/мин. Область II ($Da_z < 1, Pe_T > 1$) — равномерное по длине, но термически ограниченное осаждение: центральные слои золя не прогреты до T_{wall} , покрытие может быть равномерным, но более тонким. Область III ($Da_z > 1, Pe_T < 1$) — полный прогрев при сильном истощении: осаждение сосредоточено у входа, аналог статического режима. Область IV ($Da_z > 1, Pe_T > 1$) — наихудшая комбинация.

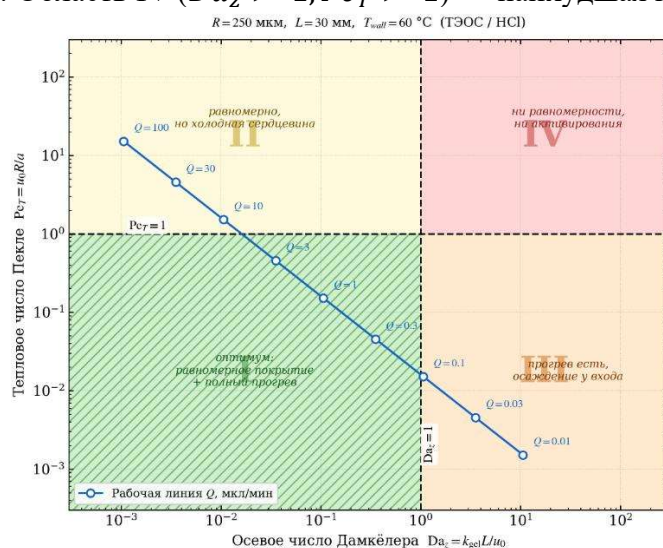


Рис. 1. Режимная карта в координатах (Da_z, Pe_T), логарифмическая шкала. Штриховые линии — $Da_z = 1$ и $Pe_T = 1$; заштрихованная область I — оптимальное окно расходов для системы ТЭОС/НСІ при $R = 250$ мкм, $L = 30$ мм, $T_{wall} = 60$ °С.

Fig. 1. Regime map in the (Da_z, Pe_T) coordinates, logarithmic scale. Dashed lines correspond to $Da_z = 1$ and $Pe_T = 1$; the hatched area I marks the optimal flow-rate window for the TEOS/HCl system at $R = 250$ μ m, $L = 30$ mm, $T_{wall} = 60$ °C.

Обсуждение

Физическая интерпретация результатов сводится к смене лимитирующего механизма при переходе «статика → прокачка». В статическом режиме отсутствие поступления свежего мономера и подавление свободной конвекции делают определяющим масштабом длину диффузионного истощения $L_{dep} \sim \sqrt{\frac{D}{k_{gel}}}$, не зависящую от длины канала; зона активного осаждения локализуется у входа. В проточном режиме осевая конвекция непрерывно обновляет мономер у стенки; характерными масштабами становятся L (через Da_z — оценка осевого истощения) и R (через Pe_T — оценка полноты теплового активирования). Условие $Da_z < 1$ управляемо через расход Q , тогда как условие $L < L_{dep}$ в статике геометрически нарушено и не может быть компенсировано.

Сопоставление с известными работами по золь-гель функционализации микроканалов из стекла, кремния и PDMS выявляет два принципиальных отличия настоящей системы. Первое — подложка. Теплопроводность фотополимерной смолы $\lambda_{wall} \approx 0,2$ Вт/(м·К) в пять раз меньше, чем у стекла (1,0 Вт/(м·К)), и в сотни раз меньше, чем у кремния (150 Вт/(м·К)). Это делает сопряжённый теплообмен «золь-стенка-внешний нагреватель» определяющим: предположение об изотермической стенке справедливо лишь в стационарном пределе, тогда как при ускоренной прокачке профиль $T_{wall}(z)$ существенно неоднороден. Второе — ковалентная адгезия. Фотополимер, содержащий акрилатные и метакрилатные группы, при $T \geq 60$ °С образует связь Si–O–C с силанольными фрагментами; в отличие от глицерино-силоксановых покрытий на стекле, удерживаемых преимущественно водородными связями, такое прикрепление устойчиво при многократной промывке и термоциклировании [1].

Перечислим ограничения предложенной модели. Во-первых, принято ньютоновское поведение золя до $\alpha = \alpha_{gel}$; реальная вязкость нарастает плавно, и неньютоновские



эффекты (шейр-тонизация, упругая компонента) могут проявиться при $\alpha \geq 0,5$. Во-вторых, закон Аррениуса (5) предполагает единственную энергию активации; в области приближения к гель-точке кинетика осложняется диффузионным контролем. В-третьих, λ, ρ, c_p считаются постоянными — в действительности они изменяются при гелировании, особенно λ (на 20–30 %). В-четвёртых, не учтены объёмная усадка при гелировании (5–15 %) и связанные с ней деформации формирующегося слоя. В-пятых, принят равномерный профиль скорости на входе; для коротких входных участков ($z < 0,05 Pe_T R$) корректнее использовать решение Граетца. В-шестых, константа k_s принята одинаковой по длине и независимой от степени покрытия, что отражено формальным множителем $\left(1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_{max}}\right)$ о требует экспериментальной калибровки.

С практической точки зрения, оптимальное окно расходов $Q \in [0,5; 2]$ мкл/мин полностью покрывается стандартными шприцевыми насосами (Harvard Apparatus PHD, KD Scientific Legato) при шприцах 1–5 мл — технологический барьер минимален.

Заключение

Проведён сравнительный безразмерный анализ статического и проточного режимов термоактивируемого золь-гель осаждения SiO_2 в фотополимерном микроканале $R = 250$ мкм, $L = 30$ мм при $T_{wall} = 60$ °С. Получены следующие основные результаты.

1. В статическом режиме число Рэлея $Ra \approx 61 \ll Ra_c = 1708$ — естественная конвекция в канале указанного масштаба геометрически подавлена; перенос мономера полностью диффузионный.

2. Радиальное число Дамкёлера $Da_r \approx 6 \cdot 10^{-2} \ll 1$ — радиальный профиль концентрации мономера квазиоднороден, гелирование протекает равномерно по сечению.

3. Длина диффузионного истощения $L_{dep} \approx 1,0$ мм концентрирует более 90 % массы SiO_2 в первых 5–7 мм 30-миллиметрового канала — равномерное покрытие в статическом режиме принципиально невозможно.

4. В проточном режиме осевое число Дамкёлера $Da_z = k_{gel} \frac{L}{u_0}$ и тепловое число Пекле $Pe_T = u_0 \frac{R}{a}$ являются двумя управляющими безразмерными параметрами; условие одновременного выполнения $Da_z < 1$ и $Pe_T < 1$ определяет оптимальное окно расходов $Q \in [0,1; 7]$ мкл/мин с консервативной рекомендацией $Q \in [0,5; 2]$ мкл/мин.

5. Построена режимная карта в координатах (Da_z, Pe_T) , выделяющая четыре области с различной морфологией покрытия; оптимальное окно ограничено пересечением неравенств $Da_z < 1$ и $Pe_T < 1$.

6. Переход от статического к проточному режиму принципиально меняет лимитирующий механизм — от диффузионного истощения (L_{dep} — лимит) к конвективному обновлению реагента (Da_z — управление), что устраняет фундаментальное препятствие к равномерному осаждению по всей длине канала.

Следующим этапом работы является численная реализация модели (1)–(7) в COMSOL Multiphysics с учётом сопряжённого теплообмена в фотополимерной стенке и экспериментальная валидация профиля толщины покрытия $\delta(z)$ при варьировании расхода Q в окрестности предсказанного оптимума.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках основной научно-исследовательской работы автора (аспирантура ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет»).

Литература

1. Avezov, R.R., Vokhidov, A.U., Kuralov, M.A. Principles of development of solarenergy in the Republic of Uzbekistan, Modern problems of renewable energy, *A collection of materials of the republican scientific-practical conference*, Karshi, March, 18, 11-13 (2018).



2. Abdurakhmanov, A., Kuchkarov, A.A., Holov, Sh.R., Abdumuminov, A. "Calculation of optical-geometrical characteristics of parabolic-cylindrical mirror concentrating systems", *European science review*. 2017. Vol. 2. P. 201-204.
3. Klychev, Sh.I., Zakhidov, R.A., Bakhramov, S.A., Dudko, Yu.A., Khudoikulov, A.Ya., Klychev, Z.Sh., Khudoiberdiev, I.A. "Parameter optimization for paraboloid-cylinder-receiver system of thermal power plants", *Applied Solar Energy*. 2009. Vol. 45. No. 4. pp. 281–284.
4. Avezov, R.R., Avezova, N.R., Matchanov, N.A., Suleimanov, Sh.I., Abdukadirova, R.D. "History and State of Solar Engineering in Uzbekistan", *Applied Solar Energy*, 2012, Vol. 48, No. 1, pp. 14–19.
5. Amal, E.K., Oumaima, E.A., Elhassan, A. CFD Simulation of Temperature Distribution in a Parabolic Trough Collector. *Appl. Sol. Energy* 59, 311–323 (2023).
6. Koishiyev, T.K., Bekzhan, Z.B., Saribayev, A.S. Optimization Issues, Computer Modeling, and Visualization of the Efficiency Coefficient of Optical Systems of Solar Furnaces and Solar Power Plants. *Appl. Sol. Energy* 59, 324–328 (2023).
7. Abdurakhmanov, A.A. Akhadov, Zh.Z. Concentrating systems and determination of optimal parameters of the light-receiving surface, *Appl. Sol. Energy*, 2004, vol. 40, no. 3, p 39
8. Akhadov, J.Z. Study of the Performance Characteristics of a Solar Concentrator for Production of Thermal Energy. *Appl. Sol. Energy* 59, 169–175 (2023).
9. Li, R., Zeng, K., Soria, J.E., Mazza, G.A., Gauthier, Rodriguez, D.R., Flamant, G. Product distribution from solar pyrolysis of agricultural and forestry biomass residues. *Renew. Energy* 89, 27–35.
10. Luzzi, A., Lovegrove. K. Solar Thermal Power Generation, *Australian National University, Canberra*, 2004, pp. 669–683.
11. Nzihou, A., Flamant, G., Stanmore, B. Synthetic fuels from biomass using concentrated solar energy - a review. *Energy* 2012 (42), 121–131.
12. Chernova, N.I., Kiseleva, S.V., Larina, O.M., Sytchev, G.A. Manufacturing gaseous products by pyrolysis microalgae biomass. *Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*. 2018;(31-36):23-34. (In Russ.).
13. Кузьмина, Р.И., Штыков, С.Н., Панкин, К.Е., Иванова, Ю.В., Панина, Т.Г. Пирогагенетическая переработка некоторых древесных отходов и отходов лущения семян. *Химия растительного сырья*, No. 3, 2010, pp. 61-65.
14. Караева, Ю.В., Тимофеева, С.С., Гильфанов, М.Ф., Камалов, Р.Ф., Марфин, Е.А. Термохимическая конверсия лузги подсолнечника. *Химия растительного сырья*, No. 2, 2023, pp. 335-344.
15. Kharkov, V.V., Tuntsev, D.V., Kuznetsov, M.G. Thermochemical processing of sun flower husks. *Vestnik Kazanskogo GAU*, № 4(51) 2018. pp 130-134.
16. Sanchez, M., Clifford, B., Nixon, J.D. Modelling and evaluating a solar pyrolysis system. *Renewable Energy*, Volume 116, Part A, 2018, pp 630-638.
17. Habtewold, A.T., Demiss, A.A., Wondwossen, B.E. Solar assisted pyrolysis system for High-Density polyethylene plastic waste to fuel conversion. *AIMS Energy*, 2020, 8(3): 455-473.
18. Uzakov, G.N., Davlonov, H.A., Holikov. K.N. Study of the Influence of the Source Biomass Moisture Content on Pyrolysis Parameters. *Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika)*, 2018, Tom 54, Vipusk 6, Pages 481 – 484.



19. Uzakov, G.N., Novik, A.V., Davlonov, X.A., Almardanov, X.A., Chuliev, S.E. Heat and Material Balance of Heliopyrolysis Device. *Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66, 1, 57-65 (2023).
20. Davlonov, X. and at al. Study on heat and material balance of heliopyrolysis device. *AIP Conference Proceedings*, 2686 020023 (2022).
21. Uzakov, G.N., Almardanov, X.A., Kodirov, I.N., Aliyarova, L.A. Studying the temperature regime of the heliopyrolysis device reactor. *E3S Web of Conferences*, 2023, 411, 01040.
22. Uzakov, G.N., Almardanov, X.A., Kodirov, I.N., Aliyarova, L.A. Modeling the heat balance of a solar concentrator heliopyrolysis device reactor. *BIO Web of Conferences*, 2023, 71, 01098.
23. Knysh, L. Modeling of energy characteristics of parabolic concentrators based on Monte Carlo ray tracing method, *Applied Solar Energy* 57, 2021, Volume 57, Issue 5, pp. 413–419.
24. Умаров, Г.Я., Захидов, Р.А., Ходжаев, А.Ш. Распределение лучистого вектора в поле излучения параболоцилиндрического концентратора. *Гелиотехника*, 1976, - №1, с. 27-32.
25. Ароян, О.С., Геруни, С.П. Программа расчета параметров солнечного параболоцилиндрического концентратора. *Альтернативная энергетика и экология*, №.11, 2005. - с. 42-45.
26. Ахатов, Ж.З. Приемник-парогенератор автономной солнечной-теплоэнергетической установки мощностью 5 кВт. *Гелиотехника*, 2010, - №4, с. 48-51.
27. Ахатов, Ж.З. Комбинированная энергоустановка с концентраторами солнечного излучения. *Монография. Lambert AP (Германия)*, 2016. – 129 с.
28. Рылов, Ю.П. Упругодеформированные тонкостенные концентраторы солнечной энергии. *Журнал технической физики*, 2003, том 73, выпуск 11, 123-129 с.
29. Собиров, Ю.Б. Методы измерения коэффициентов отражения зеркал и коэффициентов пропускания стекол. *Universum: технические науки: электрон. научн. журн.* 2021. 10(91).
30. Быстрицкий, Г.Ф. Основы энергетика: Учебник. – М.: ИНФРА-М, 2007. – 278 с.