



Численное моделирование процессов тепло-и массопереноса при движении теплового фронта в среде с субмикронными порами

А.А. Марков

ИПМех РАН

markov.ipm@yandex.ru



Содержание

❖ Мотивации

❖ Моделирование потоков в микропорах с учетом больших чисел Кнудсена

❖ Особенности тепло-и массопереноса в моделировании синтеза нанопорошков за волной горения

❖ Заключение



Скольжение и парадокс Кнудсена

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_g r \frac{\partial u}{\partial r} \right) = p_x, \quad 0 < r < r_1$$

$$u'(0) = 0, \quad \mu_g u'(r_1) = -B_u u(r_1)$$

$$u(r) = -p_x \left(\frac{1}{4\mu_g} (r_1^2 - r^2) + \frac{r_1}{2B_u} \right)$$

$$\frac{u_0 \rho}{B_u} = \frac{u_0 \rho}{b_u \sqrt{\rho p}} = \frac{M_A \sqrt{\gamma}}{b_u} = k_1 Kn$$

$$Q_{puas} / Q_0 = \frac{(-r_1^2 p_x)}{u_0 8 \mu_g}$$

$$Q_{slip} / Q_0 = \frac{(-r_1 p_x)}{u_0 B_u}$$

$$Kn = \frac{M_A}{Re} \sqrt{\frac{\gamma \pi}{2}}$$

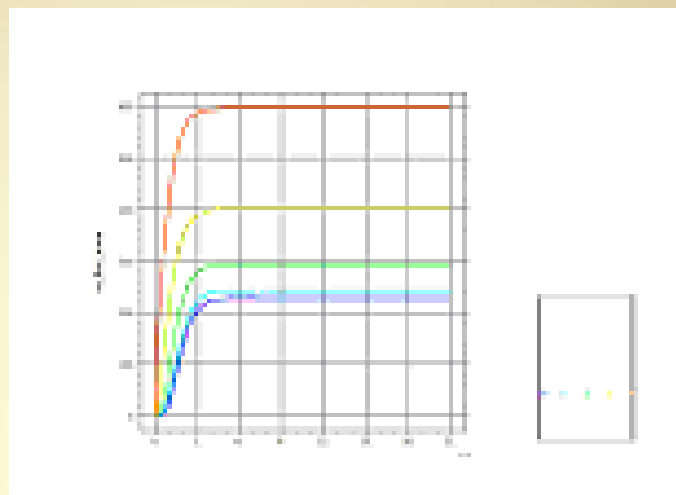
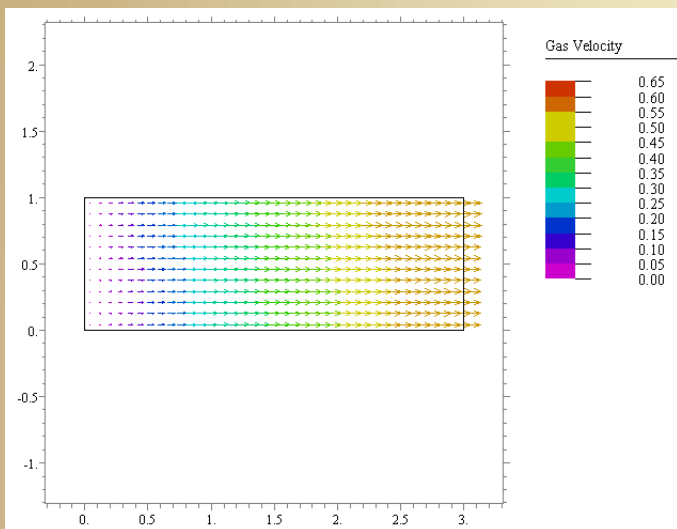
$$\frac{Q_\Sigma}{Q_0} = \frac{q_1}{Kn} + q_2 Kn$$

$$q_1 = f_0 \frac{1}{M_A \gamma} \sqrt{\frac{\gamma \pi}{2}}$$

$$q_2 = f_0 \frac{k_1}{\gamma M_A^2}$$

$$f_0 = \frac{(-r_1 p_x)}{p_0}$$

Изолированный микроканал Наномембраны



Массовый
 Расход от
 времени в
 отдельных
 Точках канала

Эффекты неравновесности: 1. Интенсификация переноса тепла и массы.

Тепловое скольжение в слое Кнудсена

2. Немонотонная зависимость по числу Кнудсена напряжения трения, Теплового потока, массового расхода. (Минимум с ростом числа Кнудсена)

3. Компрессор Кнудсена

Методы: 1.Слой Кнудсена + уравнения сплошной среды

2. Прямое моделирование ансамбля молекул (МД -молекулярная динамика)

3. Моментные уравнения Греда

4. Кинетическое уравнение Больцмана



Мотивации

Carbon combustion synthesis of oxides (CCSO)

CCSO является методом быстрого и недорогого получения нанопорошков сложных оксидов.

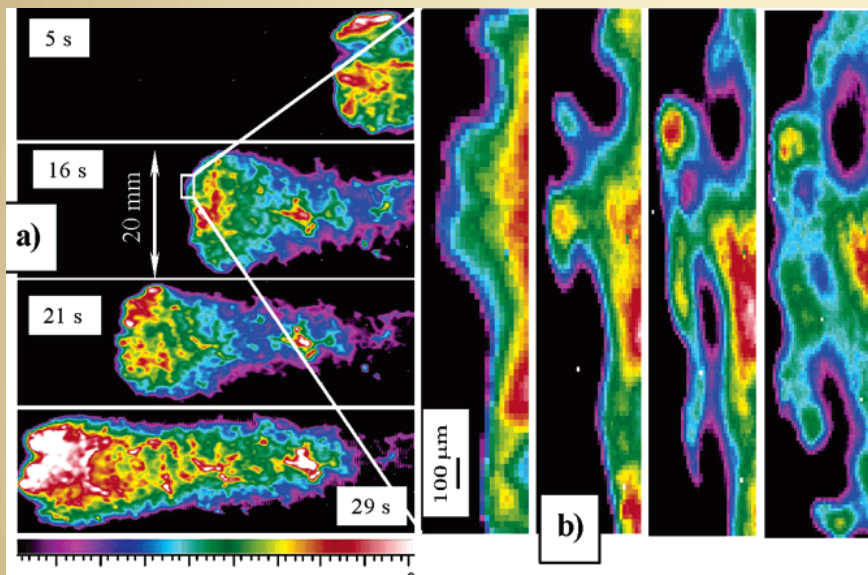
CCSO

Использует горение углерода и является модификацией метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза **self-propagating high temperature synthesis (SHS)**, который основан на горении чистых металлов.

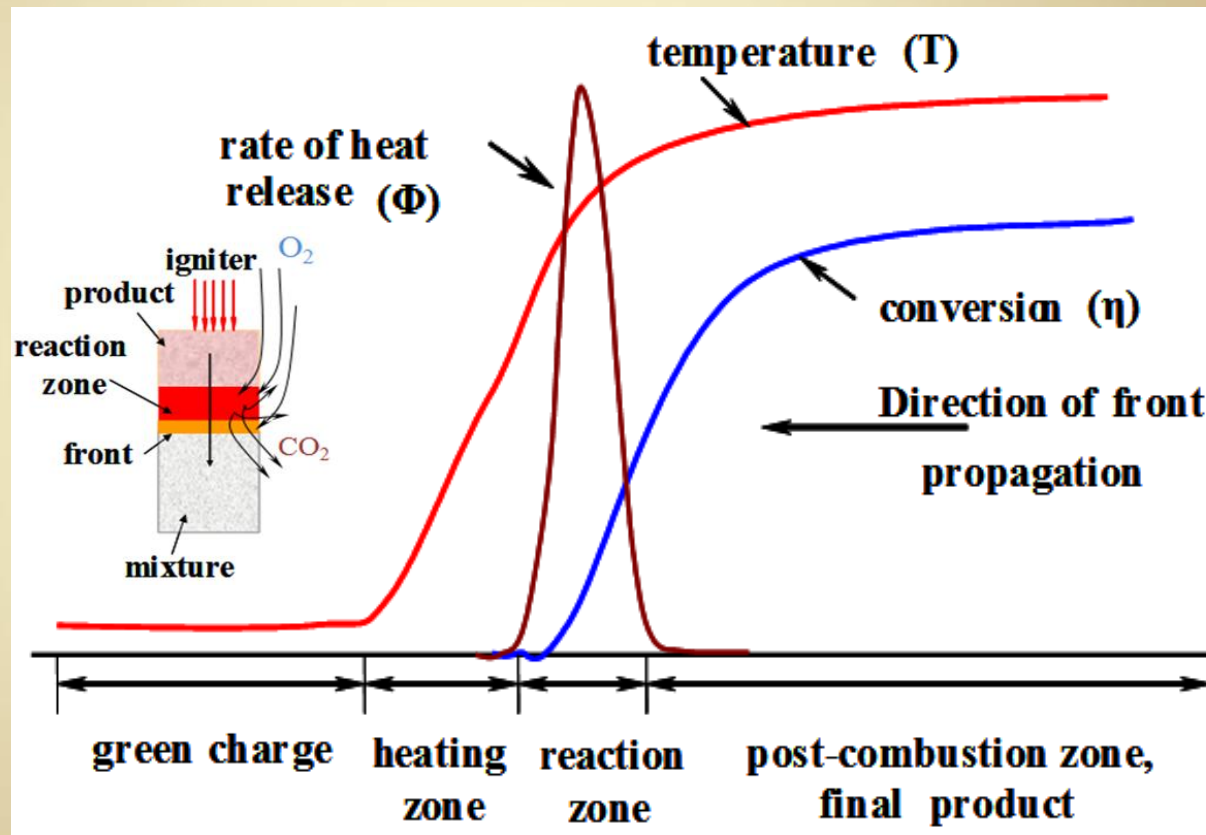
Подобно **SHS**, метод **CCSO** значительно быстрее (порядка минут) по сравнению с методом обжига (порядка нескольких часов).

CCSO имеет ряд преимуществ перед методом **SHS** (реагенты существенно дешевле, пористость продукта выше, до 70%).

ЭКСПЕРИМЕНТ СИНТЕЗА ФЕРРИТОВ



CCSO of Mn_{0.25}Zn_{0.75}Fe₂O₄
by Luss & Martirosyan (2007)





Граничные условия скольжения, скачков температуры и концентраций газа на границе поры

Субмикронный цилиндрический канал

$$-\frac{\partial}{\partial n} u_m = \frac{\text{Re} \sqrt{\bar{\rho}_g P_g}}{\mu_g} u_m B_u \quad m=1,2; \quad B_u = \frac{2-\theta}{\theta} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad u_n = 0$$

$$-\lambda_g \frac{\partial}{\partial r} T_g = \frac{c_p \sqrt{\bar{\rho}_g P_g}}{\text{Pr}} \left(\frac{T_g}{T_W} \right)^\alpha \left(b_T (-T_g + T_W) + b_W T_W \right)$$

$$-\frac{\partial}{\partial n} \bar{\rho}_g C_l = \frac{\text{Re Pr} \sqrt{\bar{\rho}_g P_g}}{\mu_g} \left(\frac{T_g}{T_W} \right)^\alpha b_T Pe_l D_T \left(-1 + \frac{T_W}{T_g} \right)$$

Микро и макро потоки

- Микро потоки тепла и вещества, обусловленные тепловым излучением в нано-порах, проскальзыванием газа, скачками температуры и концентраций на границах пор.

$$-\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_g r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = Q_{rad}^{micro} \quad 0 < r < r_1$$

$$T'(0) = 0, \quad -\lambda_g T'(r_1) = \sigma \varepsilon (T(r_1))^4$$



Микро и макро потоки

- В малой окрестности поверхности поры получаем

$$Q_{rad}^{micro} = \frac{2\sigma\varepsilon T^4}{r_1}$$

Вычисление макро потока тепла осреднением микро потоков

$$VQ_{rad}^{macro} = \sum_l \int_{V_l} Q_{rad,l}^{micro} dV$$

$$Q_{rad}^{macro} = \frac{2\sigma\varepsilon T^4 \chi}{r_1}$$



Микро и макро потоки

- Переменные Франк-Каменецкого

$$t_0 = \frac{\exp\left(\frac{E}{RT_0}\right)}{k} \quad l_0 = \sqrt{\frac{\lambda_0 t_0}{c_V \rho_0}}$$

$$\tilde{x}_k = x_k / l_0, \quad \tilde{t} = t / t_0, \quad \tilde{u}_k = u_k / u_0, \quad k = 1, 2, 3; \quad u_0 = l_0 / t_0$$

$$\tilde{p} = p / p_0, \quad \tilde{\rho}_g = \bar{\rho}_g / \rho_0 \quad p_0 = \frac{R \rho_0 T_0}{M_0}$$

$$\rho_{1g} = \chi \bar{\rho}_{1g}, \quad \rho_{2g} = \chi \bar{\rho}_{2g} \quad \bar{\rho}_g = \bar{\rho}_{1g} + \bar{\rho}_{2g}$$

$$\beta = \frac{RT_0}{E}, \quad \gamma = \frac{c_P T_0 \beta}{Q} \quad \frac{\rho_0 c_v}{t_0} = \frac{\lambda_0}{l_0^2}, \quad T = T_0 (1 + \beta \tilde{T})$$

Микро и макро потоки

- Введем локальные числа Рейнольдса и Прандтля

$$Re_{loc} = \frac{\tilde{u} l_0 \tilde{\rho}_g}{\mu}, \quad Re_{loc} = Re_0 \frac{\tilde{u} \tilde{\rho}_g}{u_0 \rho_0}, \quad Pe_{Tloc} = Pe_T \frac{\tilde{u} \tilde{\rho}_g}{u_0 \rho_0}$$

Безразмерный радиационный тепловой поток

$$\tilde{Q}_{g,rad}^{macro} = \frac{A_R}{\beta} (1 + \beta \tilde{T}_g)^4, \quad A_R = \frac{2\chi l_0^2}{r_1} \frac{\varepsilon \sigma}{\lambda_0} T_0^3, \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1$$



Микро и макро потоки

- Безразмерный тепловой макро поток, обусловленный скачком температуры

$$\tilde{Q}_{jump}^{macro} = A_T \sqrt{\tilde{\rho}_g \tilde{p}_g} \left((-\tilde{T}_g + \tilde{T}_s) + \frac{b_W}{b_T \beta} (1 + \beta \tilde{T}_s) \right) \left(\frac{1 + \beta \tilde{T}_g}{1 + \beta \tilde{T}_s} \right)^\alpha$$

$$A_T = \frac{2 \chi b_T}{r_1} \frac{l_0^2 \sqrt{\rho_0 P_0}}{\mu_0} \quad b_T = \frac{2 - \alpha'}{\alpha'} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \quad 0 \leq b_W \leq 1$$

b_W характеризует степень охлаждения поверхности пор и α' - коэффициент тепловой аккомодации поверхности пор.



Микро и макро потоки

- Макро поток переноса количества движения газовой смеси, обусловленный скольжением газа на поверхности пор

$$\tilde{J}_{slip}^{macro} = A_u \tilde{\mathbf{u}} \sqrt{\tilde{\rho}_g \tilde{P}_g}$$

$$A_u = \frac{2\chi b_u t_0 \sqrt{\rho_0 P_0}}{r_1 \rho_0}$$

$$b_u = \frac{2-\theta}{\theta} \sqrt{\frac{\pi}{2}}$$

θ - коэффициент отражения молекул от поверхности пор $0 \leq \theta \leq 1$.



Микро и макро потоки

- макро потоки вещества компонент газовой смеси, обусловленные скачками концентраций на поверхности пор

$$\tilde{J}_{C_{jump,l}}^{macro} = D_T A_T Pe_l \sqrt{\tilde{\rho}_g \tilde{p}_g} \beta \left(-\tilde{T}_g + \tilde{T}_s + \frac{b_w}{b_T \beta} (1 + \beta \tilde{T}_s) \right) \left(\frac{1 + \beta \tilde{T}_g}{1 + \beta \tilde{T}_s} \right)^\alpha + A_{C,l} Pe_l (-\tilde{\rho}_g C_{1,g} + \tilde{\rho}_{gS,l})$$

$$C_{1,g} = \frac{\rho_{O_2}}{\rho_{O_2} + \rho_{CO_2}}, \quad C_{2,g} = 1 - C_{1,g} \quad A_{C,l} = B_{C,l} \cdot \frac{2\chi t_0}{r_1} b_l$$

D_T - Коэффициент термодиффузии

b_l обозначает константу, аналогичную величине b_u и зависит от молекулярных свойств поверхности пор.



Оценки макропотоков

- Субмикронные поры $r_1 \approx 5 \cdot 10^{-7}$

$$A_u \approx 200 \chi b_u, A_{C,l} \approx 10^3 \chi b_l, A_T \approx 200 \chi b_T$$

$$A_R \approx \chi l_0^2 \varepsilon \cdot 2 \cdot 10^{10} \approx 2 \chi \varepsilon$$

- Нанопоры $r_1 \approx 5 \cdot 10^{-8}$

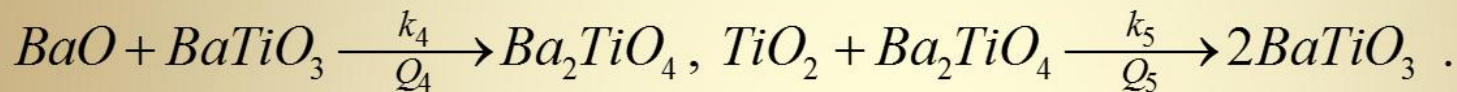
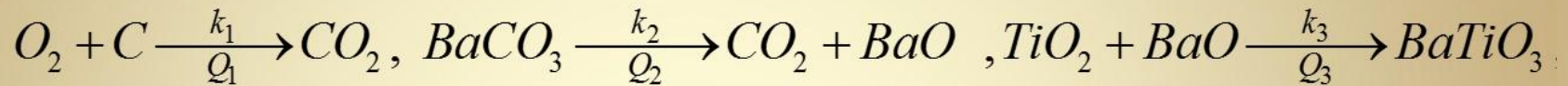
Интенсивности скольжения, скачков и теплового излучения возрастают на порядок

$$A_R \approx 20 \chi \varepsilon$$

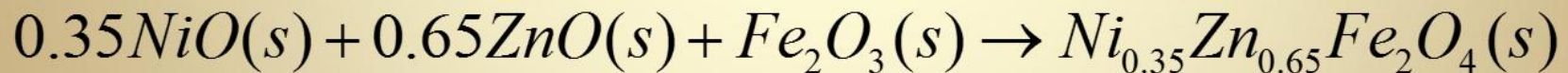


Синтез сложных оксидов методом СССО

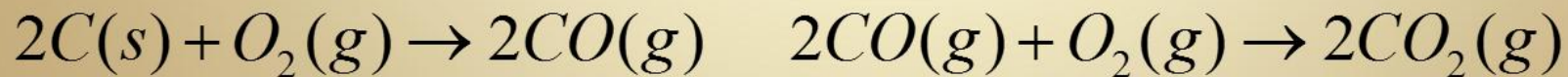
Кинетика образования титаната бария $BaTiO_3$



Кинетика синтеза никель-цинкового феррита

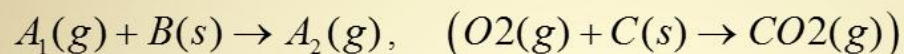


Тепловая волна формируется выделением тепла при горении углерода



Уравнения сохранения

- Сохранение вещества



$$\frac{\partial \chi \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\chi \rho_g \mathbf{u}) = (1 - \chi) (J_{S \rightarrow g}^{macro} + J_{C, jump, 1}^{macro} + J_{C, jump, 2}^{macro})$$

$$J_{C, jump, l}^{macro} = D_T A_T Pe_l \sqrt{\rho_g p_g} \left((-T_g + T_s) + \frac{b_w}{b_T \beta} (1 + \beta T_s) \right) \left(\frac{1 + \beta T_g}{1 + \beta T_s} \right)^\alpha + A_{C, l} Pe_l (-\rho_g C_l + \rho_{gS, l})$$

$$J_{S \rightarrow g}^{macro} = \rho_S \rho_{1g} k \exp\left(\frac{T_g}{\beta T_g + 1}\right), \quad J_{lg}^{macro} = \frac{M_{lg}}{M_S} J_{S \rightarrow g}^{macro}, \quad l = 1, 2$$



Уравнения сохранения

- Сохранение вещества (продолжение)

$$\frac{\partial \chi \rho_g C_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\chi \rho_g C_1 \mathbf{u}) = \nabla \cdot \left(\frac{D_{1g}}{Pe_1} \rho_g \nabla C_1 \right) - \frac{M_{1g}}{M_S} J_{S \rightarrow g}^{macro} + J_{C, jump, 1}^{macro}, \quad C_2 = 1 - C_1$$

$$\frac{\partial \rho_{1gS}}{\partial t} = -J_{1gS}^{macro}, \quad \frac{\partial \rho_{2gS}}{\partial t} = J_{2gS}^{macro}, \quad \frac{\partial \rho_S}{\partial t} = -J_{S \rightarrow g}^{macro},$$

$$J_{gS} = \rho_S \rho_{1gS} k \exp\left(\frac{T_S}{\beta T_S + 1}\right)$$



Уравнения сохранения

- Сохранение количества движения

$$\frac{\partial \chi \rho_g \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \chi \rho_g \mathbf{u} \mathbf{u} = \mathbf{S}_V + \vec{J}_{slip}^{macro} - \text{Ma}^{-2} \nabla p_g + \text{Re}^{-1} \nabla \cdot \boldsymbol{\tau};$$

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right]$$

$$(\mathbf{S}_V)_i = -u_i \kappa_i, \quad \kappa_i = \alpha_i |\mathbf{u}| + \zeta_i, \quad i = 1, 2, 3$$

$$\vec{J}_{slip}^{macro} = A_u \mathbf{u} \sqrt{p_g \rho_g}$$



Уравнения сохранения

- Уравнение теплового баланса

$$\chi \bar{\rho}_g c_g \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T_g \right) = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda_g}{Pe} \nabla T_g \right) - \kappa (T_g - T_s) + Q_{g,rad}^{macro} + Q_g^{macro} + Q_{jump}^{macro}$$

$$Q_g^{macro} = Q J_{S \rightarrow g}^{macro}$$

$$Q_{g,rad}^{macro} = \frac{A_R}{\beta} (1 + \beta T_g)^4$$

$$Q_{jump}^{macro} = A_T \sqrt{\rho_g p_g} \left((-T_g + T_s) + \frac{b_w}{b_T \beta} (1 + \beta T_s) \right) \left(\frac{1 + \beta T_g}{1 + \beta T_s} \right)^\alpha$$

Формула Левека

$$\kappa = \kappa_0 \left[1 + \text{Re}_{loc}^{0.3} \text{Pe}_{Tloc}^{0.3} \right]$$



Уравнения сохранения

- Уравнение теплового баланса (продолжение)

$$\sum_j \bar{\rho}_{jS} c_{jS} \frac{\partial T_S}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{\lambda_S}{Pe_S} \nabla T_S \right) + \kappa (T_g - T_S) + Q_{gS}^{macro},$$

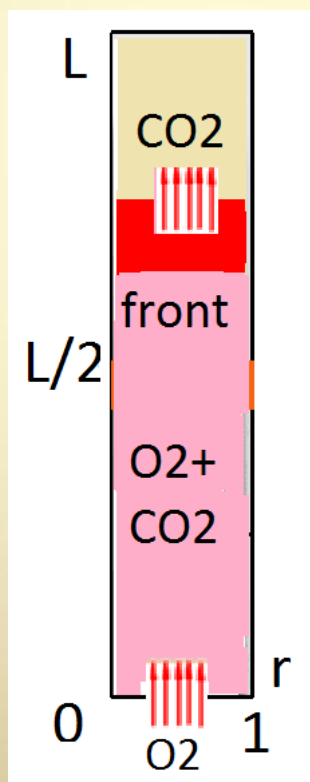
$$Q_{gS}^{macro} = Q J_{gS}$$

$$\rho_{1g} = \rho_{O_2(g)}, \quad \rho_{2g} = \rho_{CO_2(g)}, \quad \rho_S = \rho_{C(S)}$$

- ρ_{1gS}, ρ_{2gS} Значения плотностей компонент ρ_{1g}, ρ_{2g}
на поверхности пор

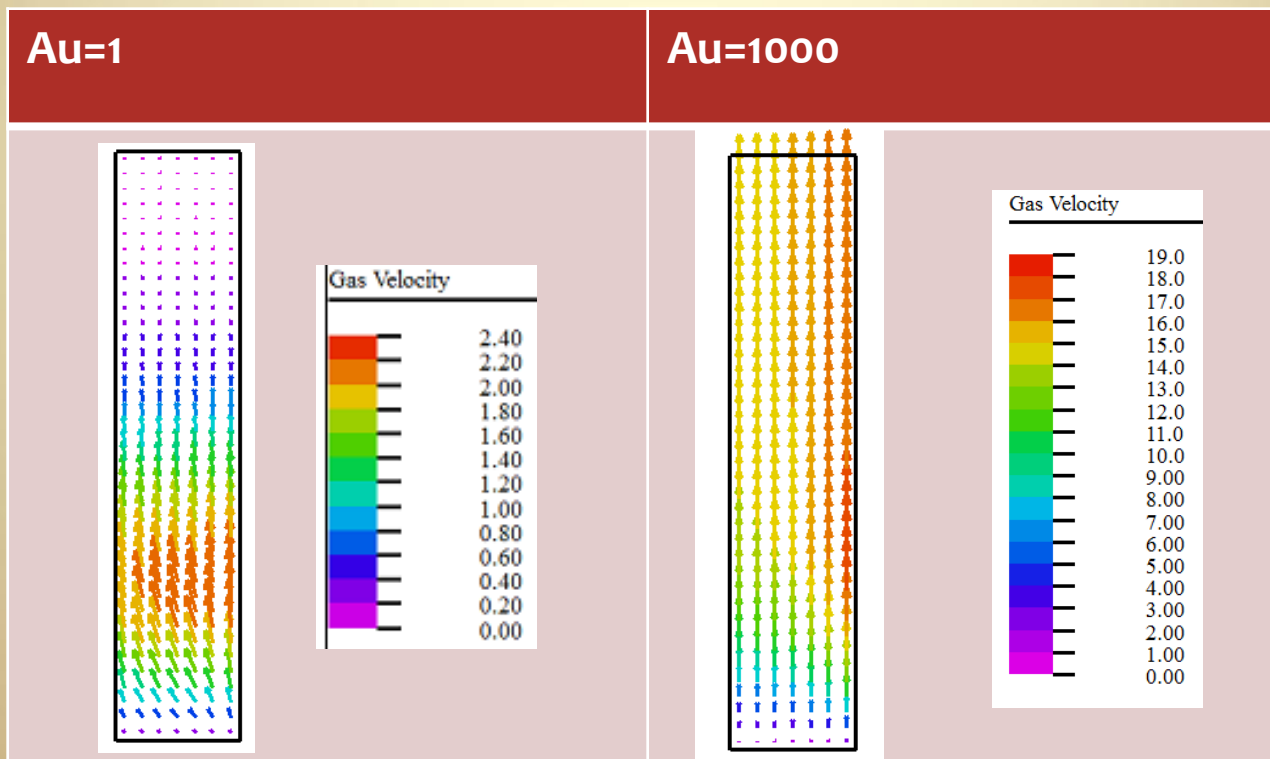
Схема реактора

Схематическое изображение тепло и массопереноса в процессе движения теплового фронта снизу вверх при подаче кислорода и поджигании с нижнего торца

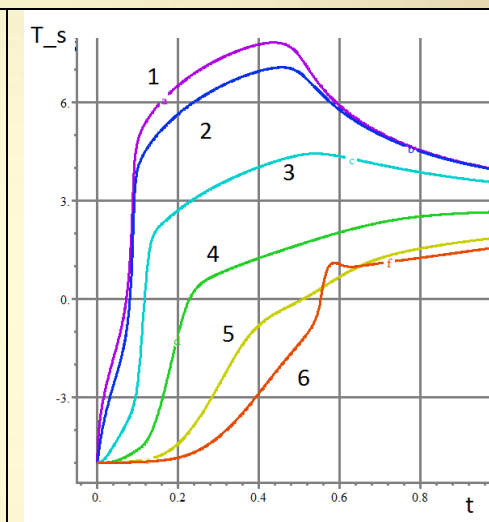
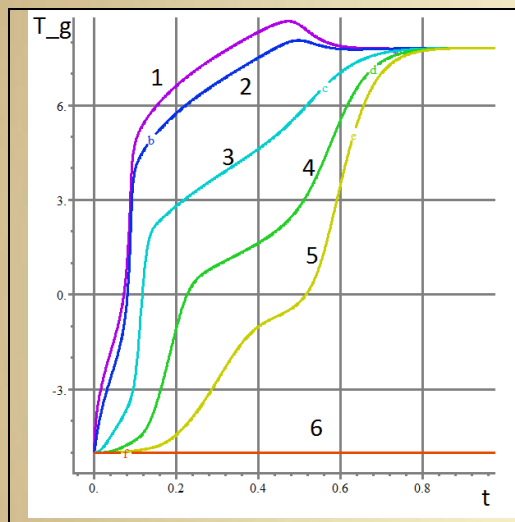


Эффект скольжения

- Поле скоростей газа в изолированной трубке в момент времени $t=0.2$



Температура газа и твердой фазы

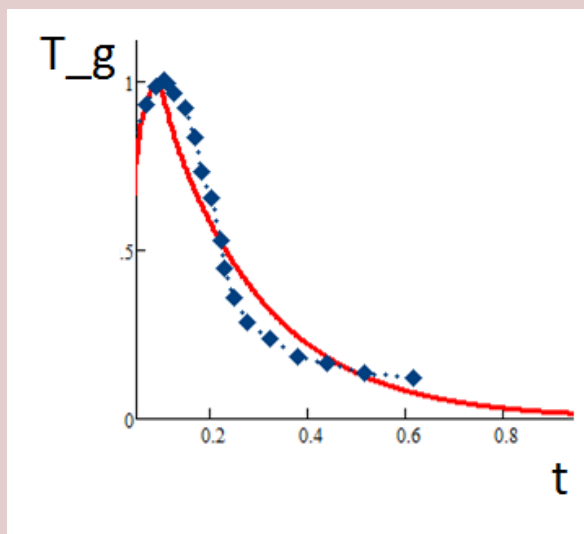


Микропоры. Показана зависимости от времени температуры газа $T_g(t, x_m, 0)$, (слева) и температуры твердой фазы $T_s(t, x_m, 0)$ (справа) в контрольных точках на оси симметрии реактора $(x_m, 0)$, $m = 0, 1, \dots, 5$ (линии 1, ..., 6 соответственно)

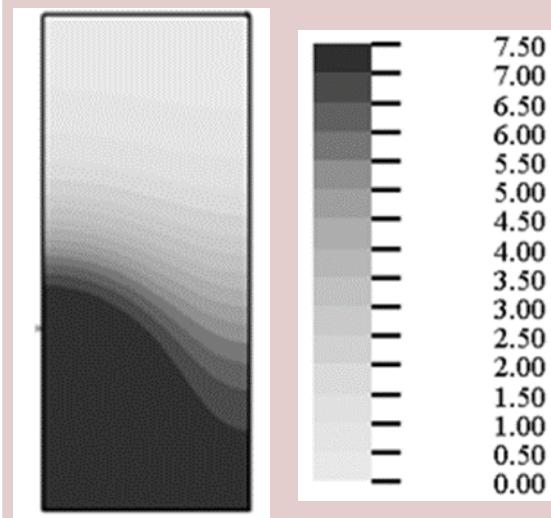
$$x_0 = 0, x_1 = 0.1 \times L, \quad x_2 = 0.25 \times L, \quad x_3 = 0.5 \times L, \quad x_4 = 0.75 \times L, \quad x_5 = L.$$

Синтез никель-цинкового феррита

Сопоставление с экспериментом Martirosian-Luss 2007 температуры газа

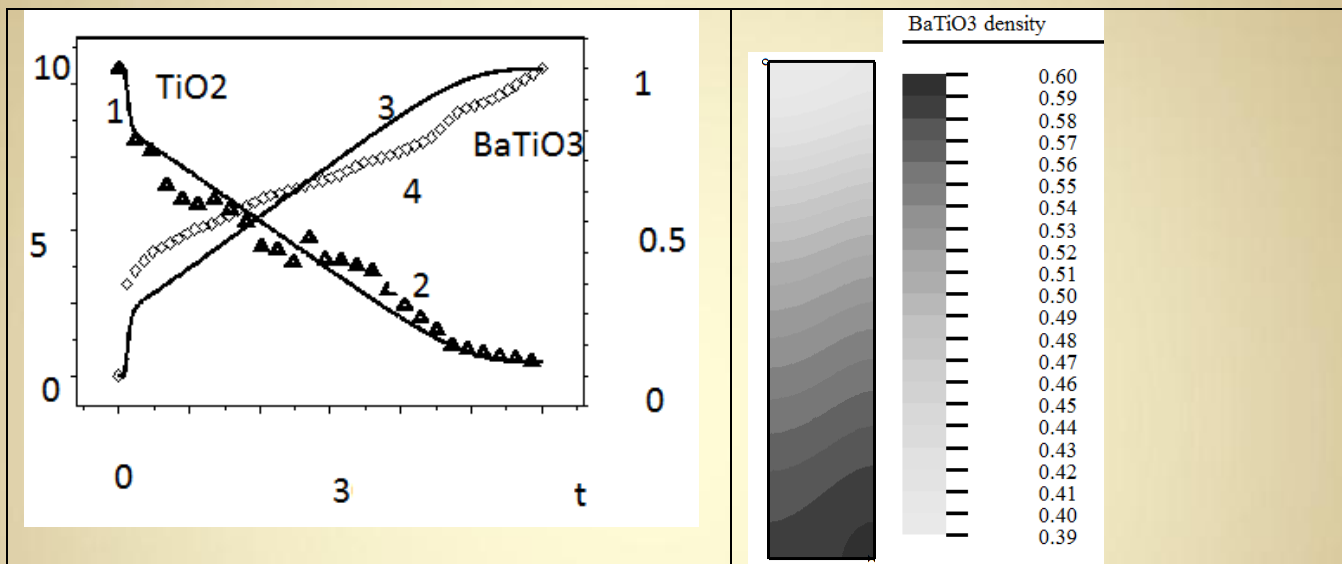


Плотность Никель-цинкового феррита в момент времени $t=2$



Синтез феррита цинка. Сопоставление с экспериментом [3](точки). Зависимость от времени нормированной температуры феррита магния-цинка в контрольной точке образца(слева). Поле продукта синтеза $Ni_{0.35}Zn_{0.65}Fe_2O_4(s)$ в $t = 2$ (справа).

Синтез титаната бария

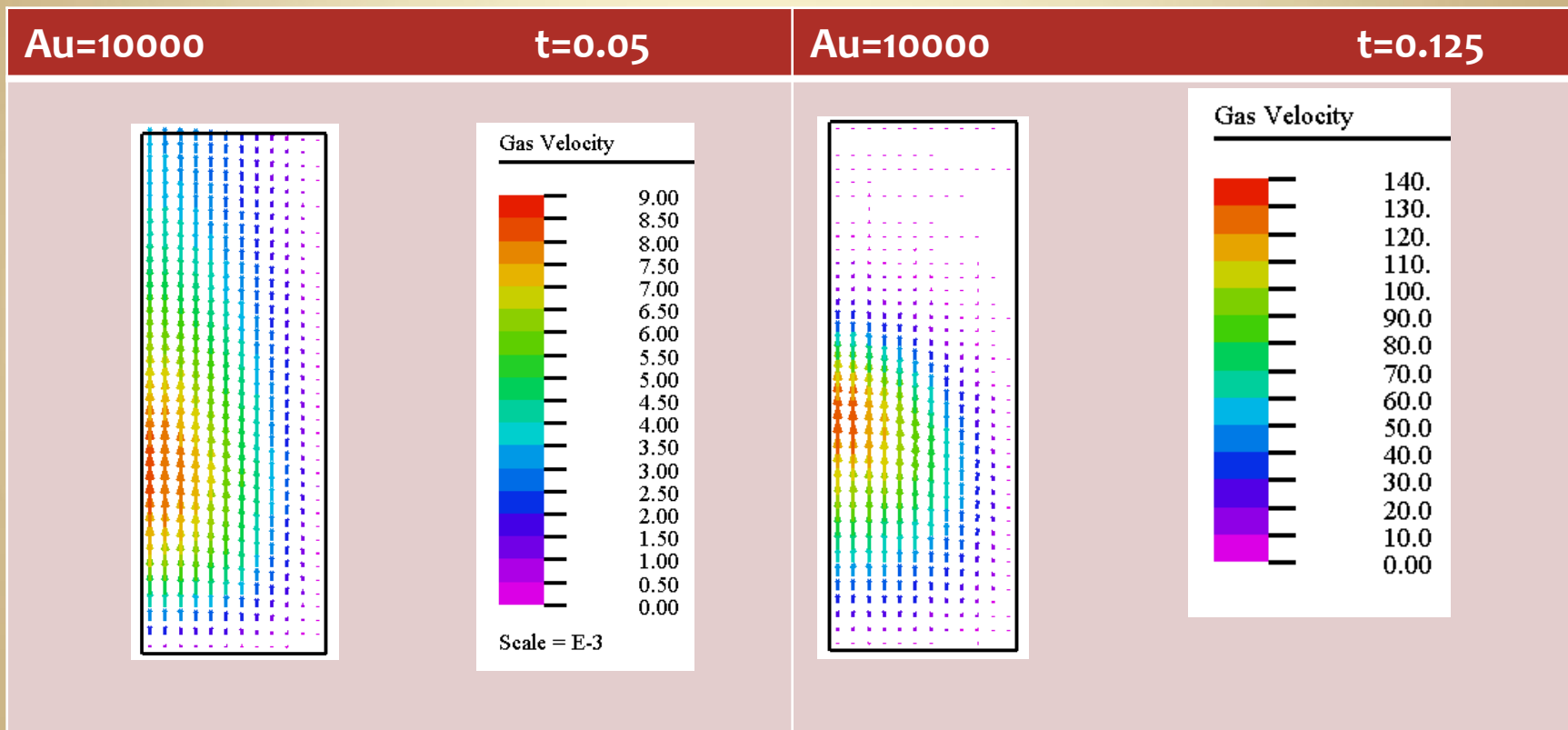


(слева) представлены расчетные и экспериментальные данные [19] (точки) для относительной концентрации титаната бария $\frac{BaTiO_3(t_{exp})}{BaTiO_3(0)}$ при $T^*=1000^\circ C$, $t_{exp}=3t$ в точке

реактора с координатами $x=0.5$, $r=0.9$. (справа) показано распределение плотности титаната бария при $Re = 10$, $Ma = 0.01$, для модели $\alpha_i = 0$, $\zeta_i = 10^3$, $\chi = 0.5$;

$$B_u = B_T = B_{O_2} = B_{CO_2} = 10^3, T_{init} = 0.5.$$

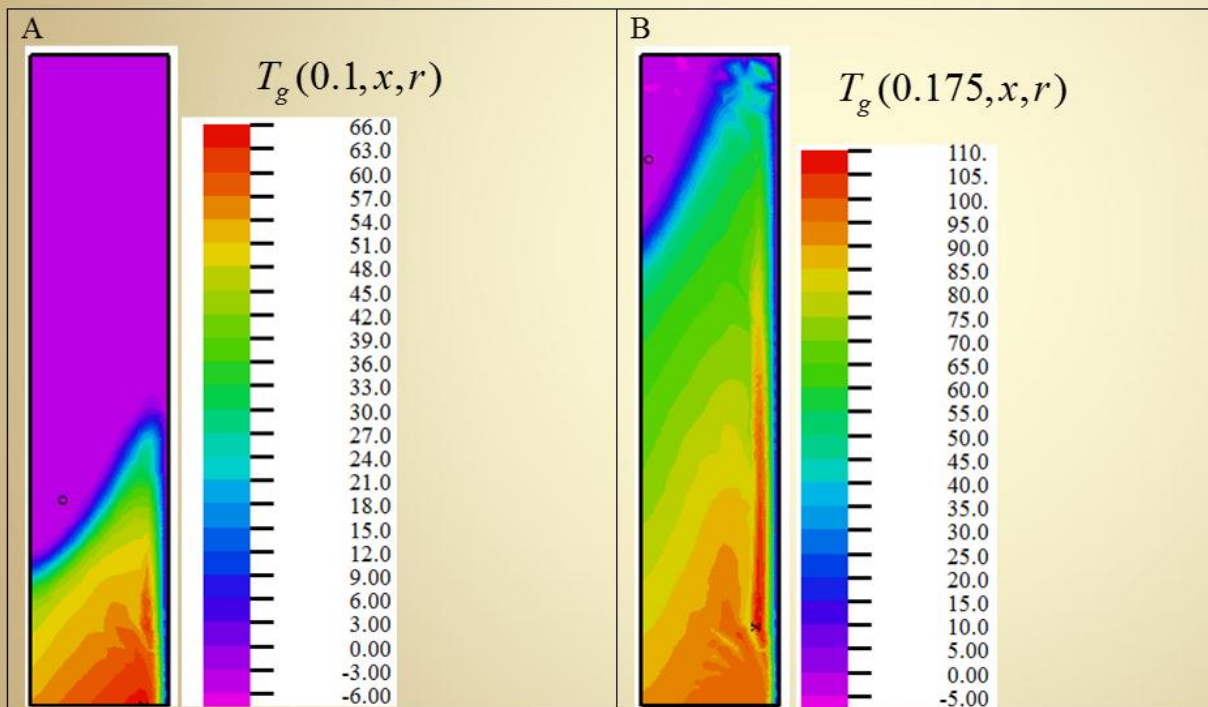
Скольжение газа в пористой трубке



Отметим рост скорости на 5 порядков на интервале времени $0.05 < t < 0.125$

Скольжение и скачки только на поверхности пор

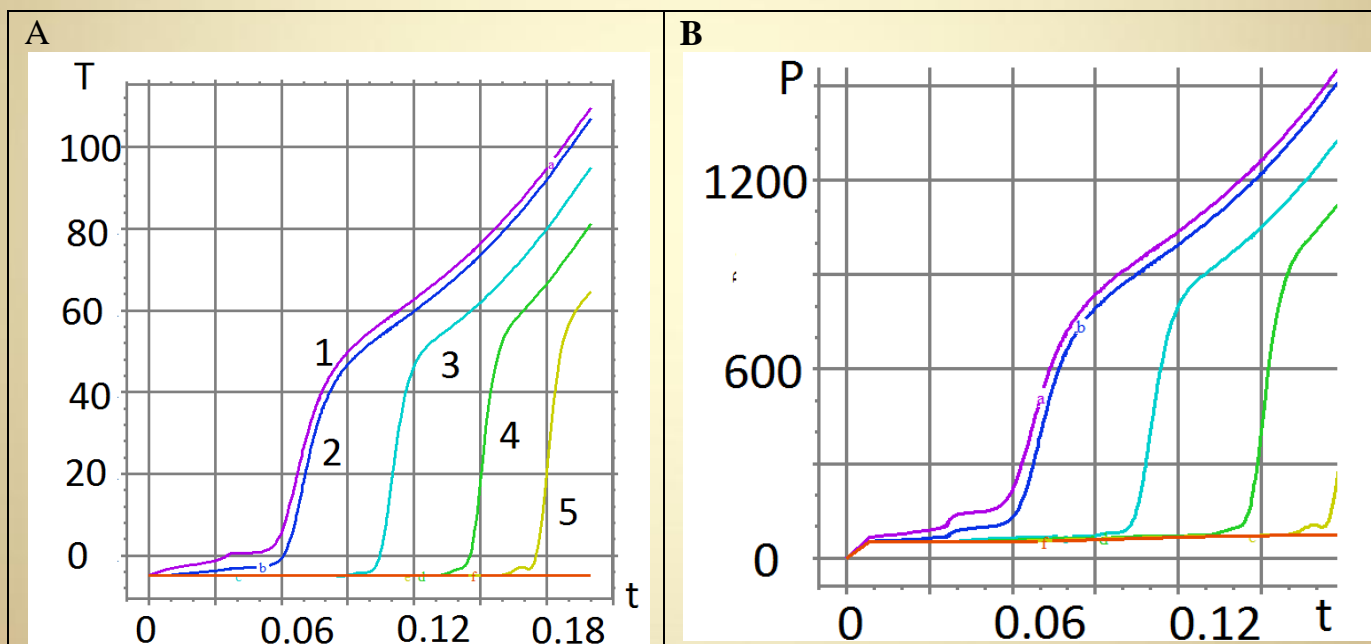
Скольжение $Au=1000$ при интенсивностях температурного скачка $\Delta T=10$, теплового излучения $AR=1$ и концентрационных скачках $\Delta CO_2=10$, $\Delta O_2=10$



Температура газа в момент времени 0.1 (A) и 0.175 (B).
Показано формирование зоны повышенной температуры (фингера)
около охлаждаемой боковой поверхности канала

Скольжение и скачки только на поверхности пор

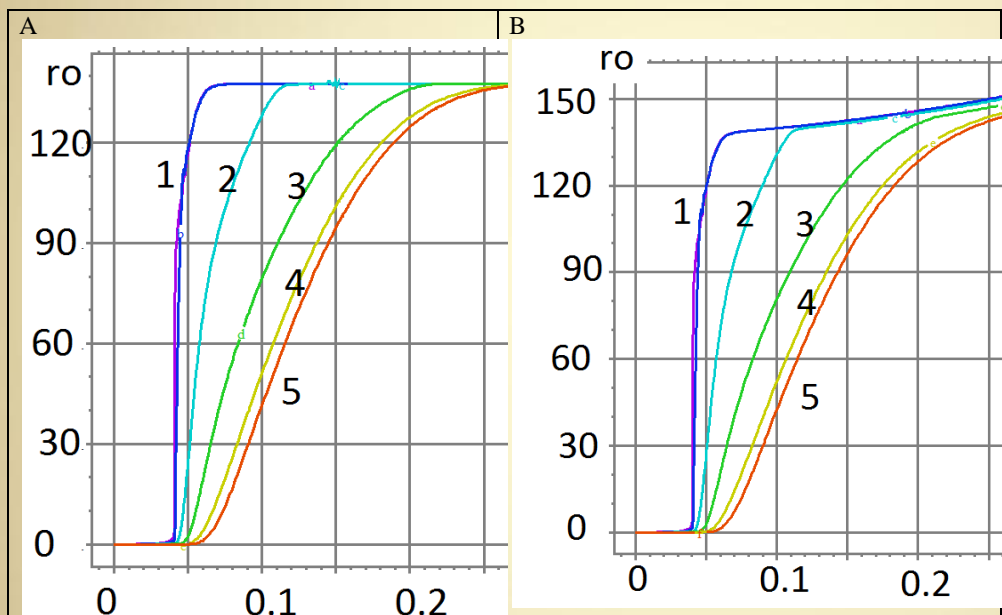
- Скольжение $Au=1000$ при интенсивностях температурного скачка $\Delta T=10$, теплового излучения $AR=1$ и концентрационных скачках $\Delta CO_2=10$, $\Delta O_2=10$



Рост температуры (слева) и давления газа (справа) в точках на оси симметрии $(0, 0)$, $(0, 0.3)$, $(0, 1)$, $(0, 1.5)$, $(0, 2)$, $(0, 3)$

Увеличение плотности газа в порах при скольжении и скачках

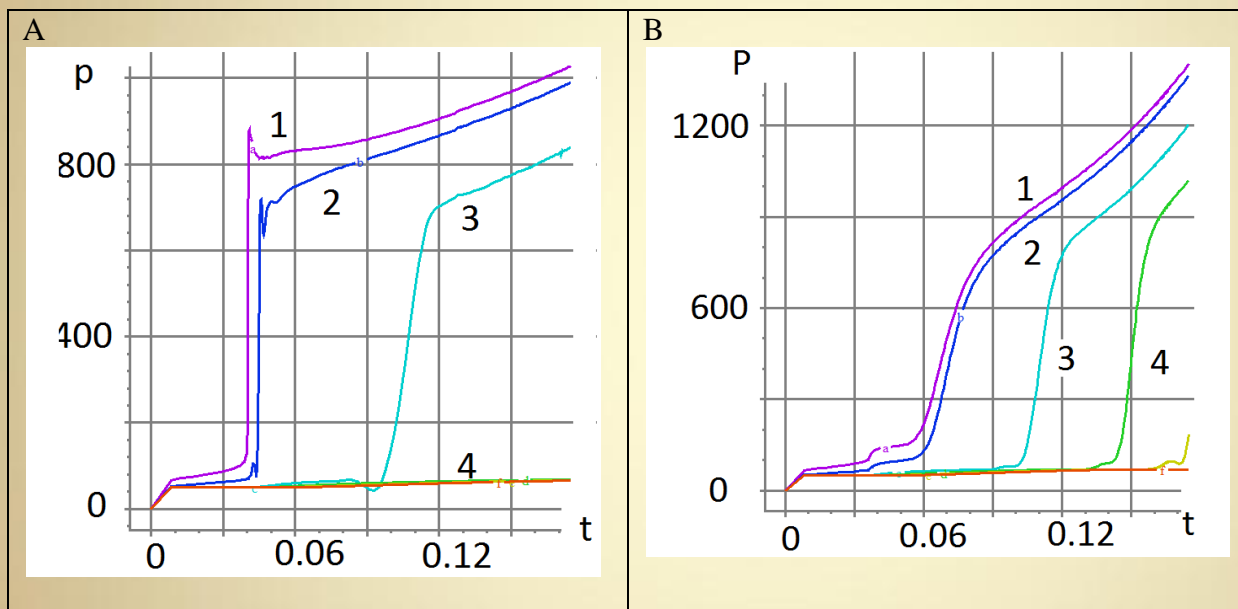
- тепловое излучение $AR=1$



Рост плотности газа при отсутствии скольжения и скачков (слева) и при скольжении $Au=1000$ при интенсивностях температурного скачка $AT=10$ и концентрационных скачках $ACO_2=10$, $AO_2=10$ (справа) в точках на оси симметрии с координатами $(0, 0)$, $(0, 0.3)$, $(0, 1)$, $(0, 1.5)$, $(0, 2)$, $(0, 3)$

Увеличение давление газа в порах при скольжении в случае нулевых интенсивностях температурного концентрационных скачков

- тепловое излучение $AR=1$



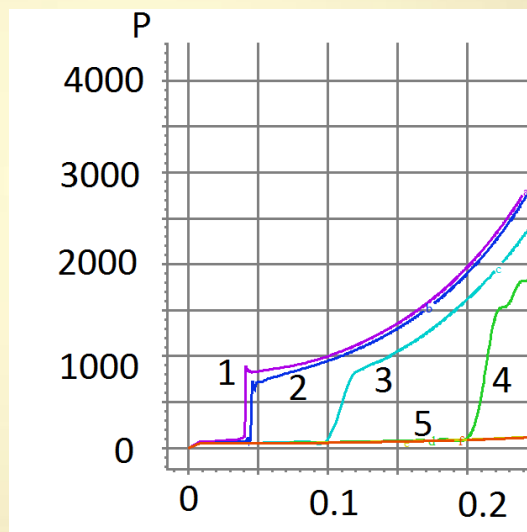
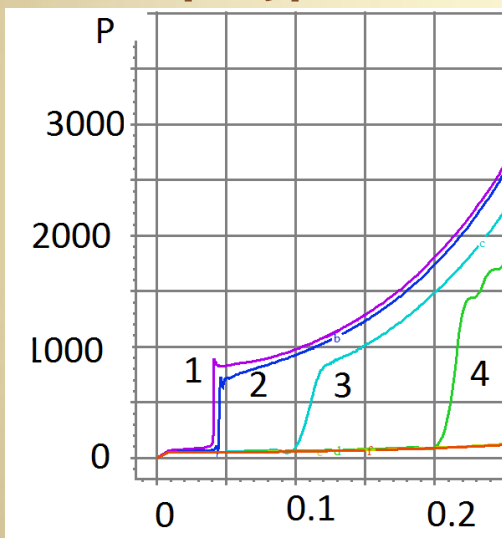
Рост давления газа при скольжении $Au=10$ (слева) и при скольжении $Au=100$ (справа)

в точках на оси симметрии с координатами

$(0, 0), (0, 0.3), (0, 1), (0, 1.5), (0, 2), (0, 3)$

Увеличение давление газа в порах с ростом теплового излучения при нулевом скольжении в случае нулевых интенсивностях концентрационных скачков

- Температурный скачок $\Delta T=100$



Рост давления газа при $AR=1$ (слева)

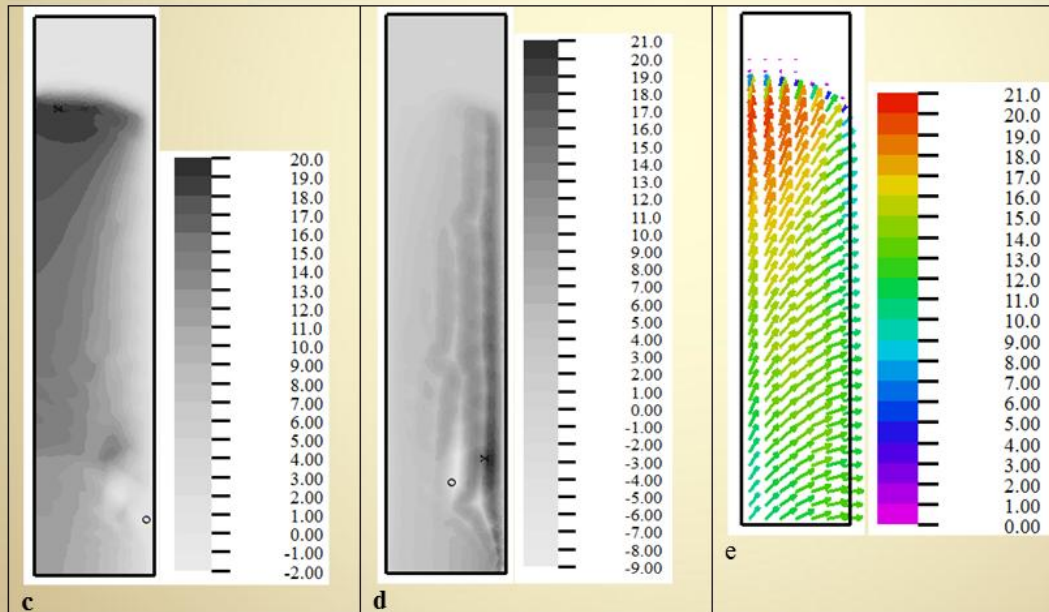
и при скольжении $AR=2$ (справа)

в точках на оси симметрии с координатами

$(0, 0), (0, 0.3), (0, 1), (0, 1.5), (0, 2), (0, 3)$

Скорость газа

Скольжение $Au=1000$ при интенсивностях температурного скачка $\Delta T=10$, теплового излучения $AR=1$ и концентрационных скачках $\Delta CO_2=10$, $\Delta O_2=10$



Поля компонент $u(t, x, r)$ (A), $v(t, x, r)$ (B) скорости газа и распределение вектора скорости $\mathbf{u}(0.3, x, r)$ (C) в момент времени $t = 0.3$



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ❖ Представлена модель взаимного влияния макро и микромасштабов синтеза сложных оксидов субмикронной дисперсности.
- ❖ Проанализированы эффекты скольжения газа в микропорах при больших числах Кнудсена.
- ❖ Предложены модели расчета теплового излучения в порах субмикронного размера с учетом скачков температуры и концентраций на границах пор.
- ❖ Проведены расчеты микро и макромасштабов синтеза никель-магниевого феррита и титаната бария. Результаты расчетов соответствуют экспериментальным данным.



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ !

References

- 1. Yu. M. Grigoryev and I. A. Filimonov: [in Russian], J.Chem. Phys., 13, 10 (1994) pp. 147-155.
- 2. Yu.M. Grigoryev, A.A. Markov, and I.A. Filimonov: 'Modeling of the Condensed Burning in a Tube'. In: Proc. Saint-Venant Symposium, Paris, Aug. 27--30, 1997 pp. 221—228
- 3. Markov A.A. “Micro and Macro Scale Technique for Particle Growth Simulation”, Computational Fluid Dynamics Review 2010. World Scientific 2010, Chapter 24, pp. 583-600.
- 4. Markov A. A. Micro and macro scale technique for strongly coupled two-phase flows simulation. Computers & Fluids 38 (2009) 1435–1444.
- 5. Martirosyan K.S., and D. Luss, Carbon Combustion Synthesis of Oxides: Process Demonstration and Features, AIChE J., 51, 10, 2801-2810, 2005.
- 6. Merzhanov, A. G. 2004 The Chemistry of Self-Propagating High-Temperature Synthesis. J.
- 7. A.A. Markov, I.A. Filimonov, and K.S. Martirosyan. Simulation of front motion in a reacting condensed two phase mixture, J. Comput. Phys. Volume 231, Issue 20, 15 August 2012, Pages 6714–6724 (2012).
- 8. A.A. Markov, I. Filimonov and K.S. Martirosyan, Thermal Reaction Wave Simulation using Micro and Macro Scale Interaction Model, pp. 929-936, in book, Computational Fluid Dynamics 2010, ed. by A. Kuzmin, Springer, p. 995, 2011.
- 9. A.A. Markov, I. A. Filimonov, and K. S. Martirosyan. Carbon Combustion Synthesis of Oxides: Effect of Mach, Peclet, and Reynolds Numbers on Gas Dynamics.// ISSN 1061-3862, International Journal of Self Propagating High Temperature Synthesis, 2013, Vol. 22, No. 1, pp. 11–17. © Allerton Press, Inc., 2013.
- 10. Markov A. A. Jump-Slip simulation technique for combustion in submicron tubes and submicron pores. // Computers and Fluids 99C (2014), pp. 83-92.

11. J.K. Holt et al. Fast mass transport through sub-nanometer carbon nanotubes. Science v. 312. 19 May 2006.

12. Jan Eijkel. Liquid slip in micro- and nanofluidics; recent research and its possible amplifications. Lab Chip, 2007, v.7, p299-301.

13. А. А. Абрамов, А. В. Бутковский, Режимы течения Куэтта с теплопередачей в разреженном газе, ЖЭТФ, т. 143, в. 6, 1202 (2013). С.84

14. A.A. Abramov, A.V. Butkovskii, "On the Rayleigh Problem in the transitional regime: The sign change effect of the energy flux and other effects," Phys. of Fluids, 26, 077101 (2014).

15. Elizarova T.G., Shirokov I.A., Montero S. Numerical Simulation of Shock-wave Structure for Argon and Helium // Phys. Fluids. 2005. V. 17. 068101.

16. В. Я. Рудяк, А.А. Белкин, В. В. Егоров, Д.А. Иванов МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЙ В НАНОКАНАЛАХ МЕТОДОМ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ // НАНОСИСТЕМЫ: ФИЗИКА, ХИМИЯ, МАТЕМАТИКА, 2011, 2 (4), С. 100–112

17. Cheng H.K. The blunt body problem in hypersonic flow at low Reynolds number // IAS Paper. 1963. № 63-92. 100 p.

18. Брыкина И.Г., Рогов Б.В., Тирский Г.А. О применимости континуальных моделей в переходном режиме гиперзвукового обтекания затупленных тел // ПММ. 2009. Т. 73. Вып. 5. С. 700-716.





СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТОДОВ СИНТЕЗА SHS И CCSO

SHS реагенты чистые
металлы :

1000-3000 °C, 0.1-20cm/s, 10^3 -
 10^4 °C/cm

CCSO: реагенты оксиды
металлов

• 800 -1200 °C, 1-3mm/s, ~500
-1000 °C/cm

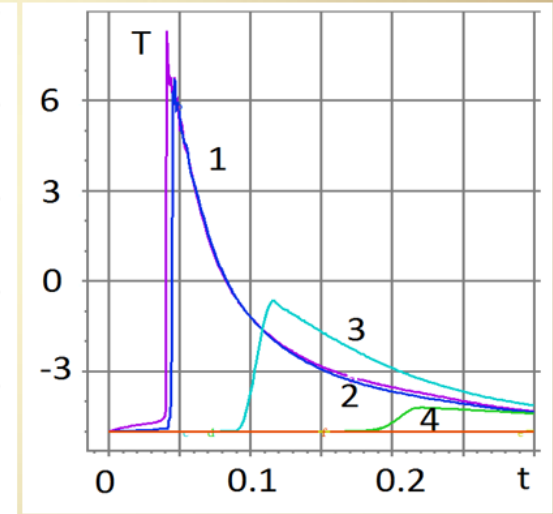
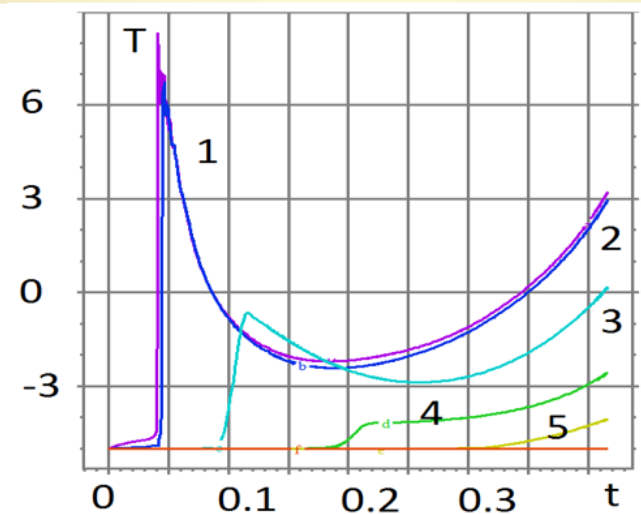
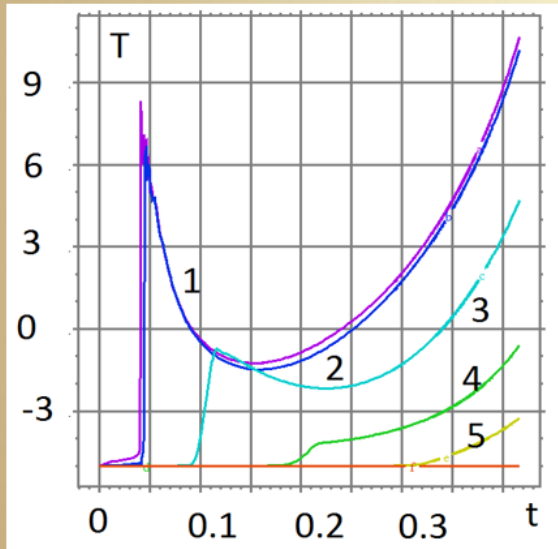
Горение металлов

Тлеющее горение



Влияние степени черноты поверхности пор на температуру твердой фазы

Степень черноты пор на фигурах (A),(B) и (C) равна $\varepsilon = 1, \varepsilon = 0.5$ и $\varepsilon = 0$



Температура тв фазы $T_S(t, x, 0)$ в точках на оси симметрии с координатами

$(0, 0), (0, 0.3), (0, 1), (0, 1.5), (0, 2), (0, 3)$