



II Международная научно-практическая конференция
«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Процессы теплообмена при фазовых и химических превращениях в микроразмерных системах. Фундаментальные исследования и практические приложения

Кузнецов В.В.

e-mail vladkuz@itp.nsc.ru

Institute of Thermophysics SB RAS



16-18 сентября 2020 г
Воронеж, Россия





Введение

«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Применение микроструктурных аппаратов в различных областях техники

Газовые и парогазовые турбины, водородная энергетика, топливные элементы, высокотемпературные парогенераторы, газотурбинные двигатели, двигатели внутреннего сгорания, ракетные двигатели, космическое оборудование, ядерная энергетика, малая энергетика

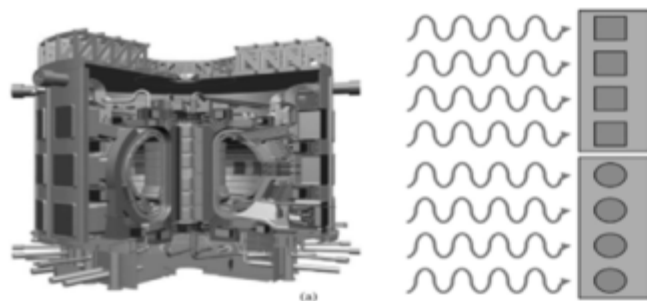
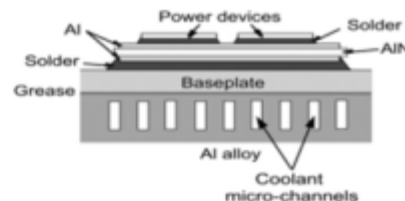


Схема охлаждения стенки реактора ITER (Mudawar, 2011).



Двухфазное охлаждение микропроцессоров

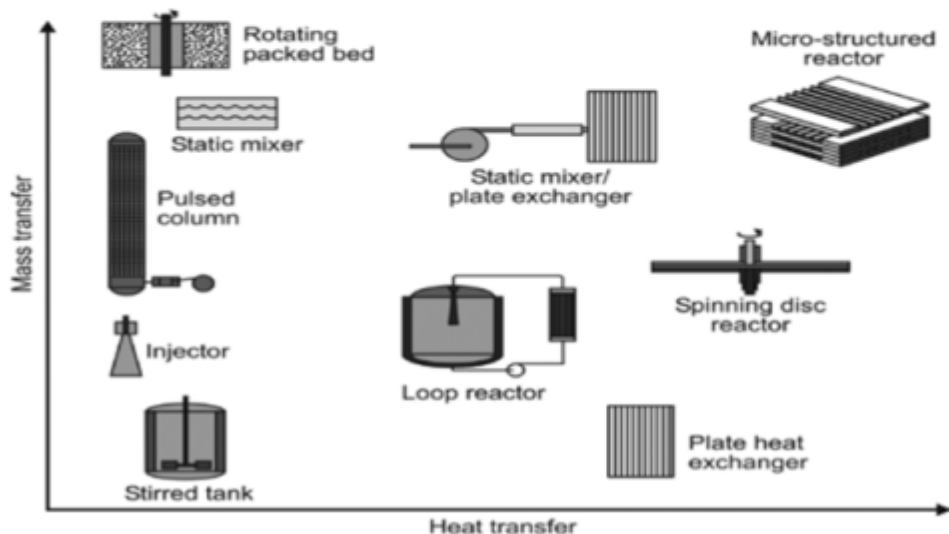


«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Перспективные направления повышения энергоэффективности

- Создание аппаратов с экстремально высокой удельной поверхностью
- Микроструктурирование рабочей поверхности
- Наноструктурирование поверхности реакторов/теплообменников

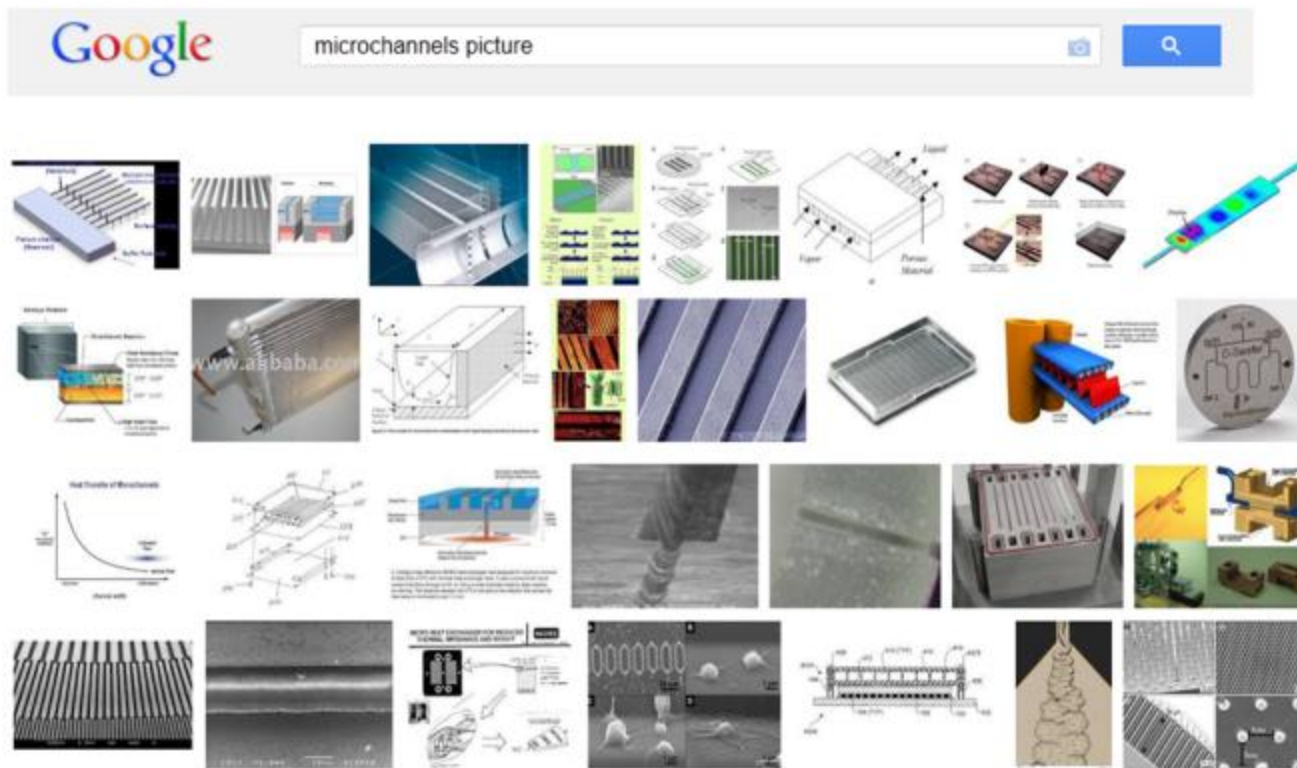
Качественные изменения в методиках моделирования процессов!





«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

МИКРОРАЗМЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ





«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Применение микроструктурных систем в промышленности



Энергетика, химическая технология

- теплообменное оборудование и реакторы
- охлаждение теплонапряженного оборудования, терморегулирование
- интегрированные системы получения и использования водорода

Нефте- газодобыча, транспорт и переработка

- ожижение природного газа
- получение синтез-нефти процессом Фишера-Тропша (процесс GTL)

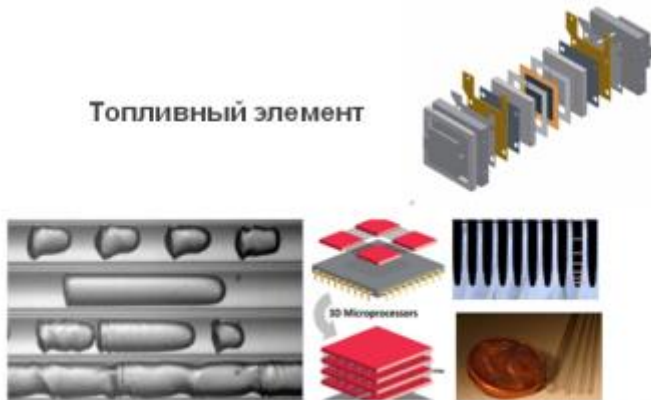
Микрожидкостные системы широкого спектра применения

- микрореакторы, управляющие системы, принтеры, lab on chip

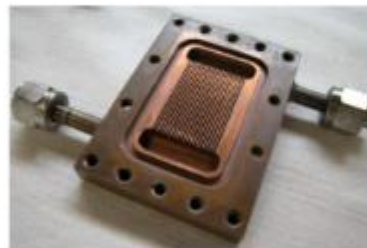
МИКРОКАНАЛЬНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

- ☐ Компактные теплообменники
- ☐ Испарители и микропарогенераторы
- ☐ Конденсаторы на основе миниканалов
- ☐ Микроканальные системы охлаждения и термостабилизации

Топливный элемент



Прямое охлаждение процессоров



Парогенератор, тепловой поток до 340 W/cm^2



Объем: 1 cm^3 , тепловая мощность: 20 kW !

«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Содержание

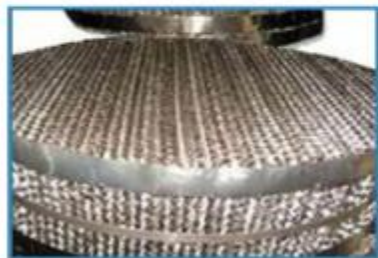
Одной из основных причин, сдерживающих разработку высокоэффективных аппаратов большой производительности с рекордными характеристиками по удельной поверхности, является отсутствие надежных методов расчета теплообмена в сложных канальных системах из-за недостаточно изученного взаимодействия процессов на макро-микро- и наномасштабах

1. Многомасштабная гидродинамика и теплообмен при газожидкостном течении в микроструктурных аппаратах
2. Методы расчета теплообмена при фазовых переходах в двухфазных компактных теплообменных аппаратах для ожижения природного газа
3. Физические механизмы теплообмена и кризиса теплоотдачи при фазовых переходах в микроканальных и микроструйных системах отвода тепла
4. Закономерности физико-химических превращений в микро- и наноразмерных системах и новые подходы к разработке микроканальных реакторов водородной энергетики и систем получения жидкого синтетического топлива

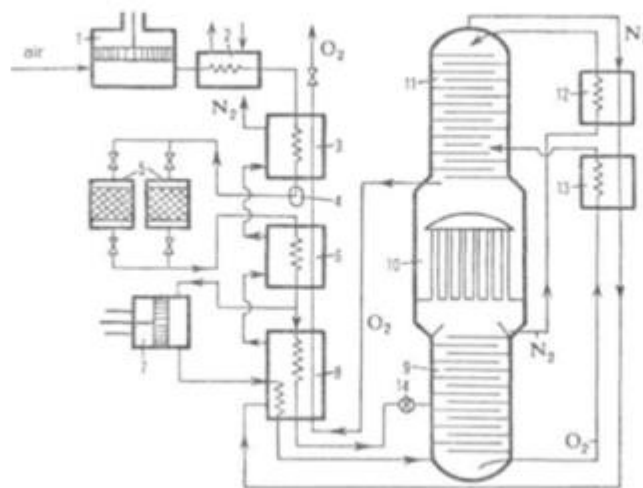


«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ТЕПЛОМАССООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ В КРИОГЕННОЙ И НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ



Структурная насадка



Ректификационная колонна



Пластинчатый теплообменник



Испаритель/конденсатор



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Тепломассообмен при разделении бинарной смеси

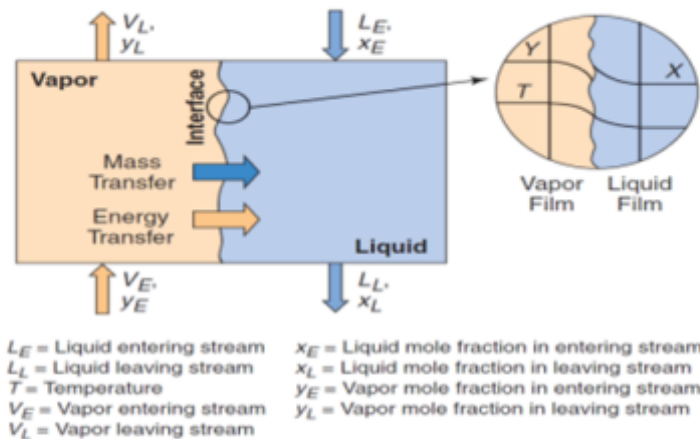
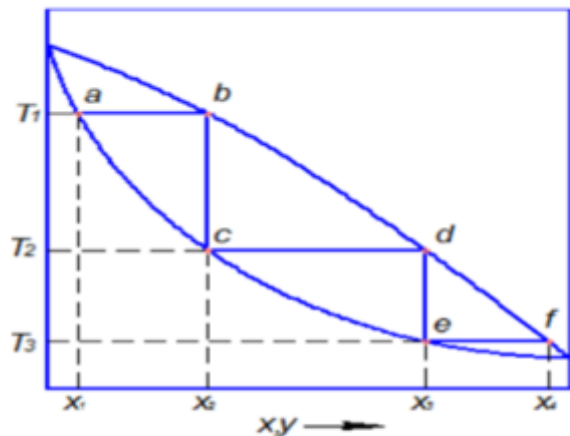


Схема процесса разделения бинарной смеси

В основе работы криогенных установок разделения воздуха лежит метод низкотемпературной ректификации, базирующийся на разности температур кипения компонентов смеси и различии составов находящихся в равновесии жидких и паровых смесей



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Расчет разделения бинарной смеси

$$-\frac{dV}{dz} = N_t^V$$

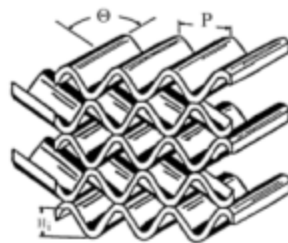
$$\frac{dL}{dz} = N_t^L$$

$$-\frac{dVY_1}{dz} = N_1^V$$

$$\frac{dLX_1}{dz} = N_1^L$$

$$-\frac{dVH^V}{dz} = E^V$$

$$\frac{dLH^L}{dz} = E^L$$



N_t – полное число молей, N_1 – число молей легколетучего компонента

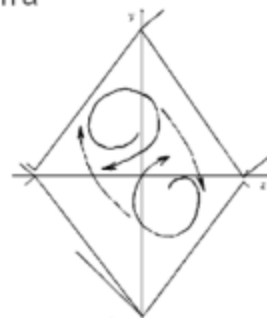
Потоки на межфазной поверхности

$$q_V + N_1^V H_{10}^V + N_2^V H_{20}^V + q_L + N_1^L H_{10}^L + N_2^L H_{20}^L = 0$$

$$N_1^V + N_1^L = 0, N_t^V + N_t^L = 0 \quad N_1^V = \bar{k}_V c_{10}^V (Y_1^I - Y_1) + Y_1^I N_t^V$$

$$N_1^L = \bar{k}_L c_{10}^L (X_1^I - X_1) + X_1^I N_t^L, \quad X_1^I = \varphi_x(T^I, p),$$

$$Y_1^I = \varphi_y(T^I, p) \quad X_1^I = (p - p_2^s) / (p_1^s - p_2^s), \quad Y_1^I = p_1^s X_1^I / p$$



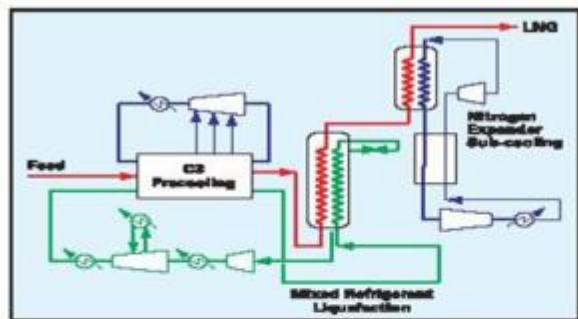
Коэффициент массоотдачи
в газовой k_V и жидкой k_L фазах

$$k_L = 2.0 \sqrt{2.0 D_L U_{\text{жл}} / \pi l_T} (1 + 0.02 \text{Re}_{L_f}^{0.2} + 0.0009 \text{Re}_{L_f}^{0.85} \text{Sc}_L^{0.65})$$

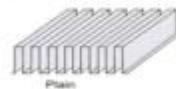
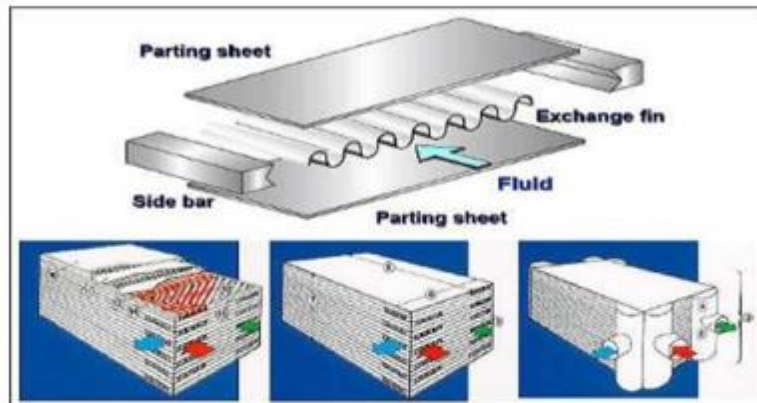


«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

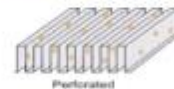
Теплообменники для разделения и ожижения газов



AP-X™ LNG Process
Source: AP



Plain



Perforated



Serrated



Herringbone

Условие энергоэффективности: высокий тепловой поток при малом температурном напоре, что достигается применением микросканалов



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

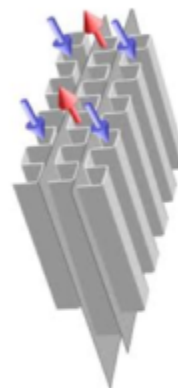
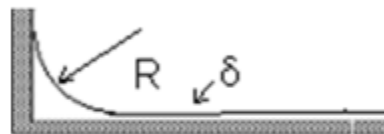
МЕТОДЫ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛОМАССОБМЕНА В МИКРОКАНАЛАХ

Выделяются течение в углу канала (кривизна поверхности постоянна) и пленочное течение, полученные решения сшиваются по линии сопряжения. Малый параметр - $\varepsilon = \delta_0/a \ll 1$ (δ_0 – начальная толщина пленки)

$$-\frac{1}{\rho_L} \nabla p_L + \nu \nabla^2 U + G = 0$$

$$\text{div} U = 0$$

$$U = (u, v, w), \quad G = (g, 0, 0)$$



Counter Flow

Условия на межфазной поверхности $z = \delta(x, y)$: $w = u \frac{\partial \delta}{\partial x} + v \frac{\partial \delta}{\partial y}$

$$p_L - p_V + \sigma k + p_d = \mu e_{ij} n_i n_j, \quad p_d = A_0 / (6\pi\delta^3) \quad \mu e_{ij} \tau_i n_j = \chi \quad e_{ij} t_i n_j = 0$$

χ - напряжение трения, e_{ij} – тензор скоростей деформаций

Метод Volume of Fluid $\frac{\partial \alpha}{\partial t} + (u \cdot \nabla) \alpha = 0$

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho \cdot g_i + f_{s,i}$$

$$f_{s,i} = -\sigma \cdot \nabla \left(\frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \right) \cdot \nabla_i \alpha \quad \rho = \rho_1 \cdot (1 - \alpha) + \rho_2 \cdot \alpha$$

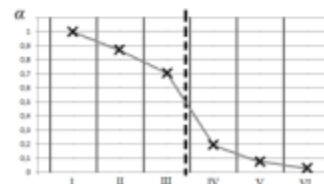
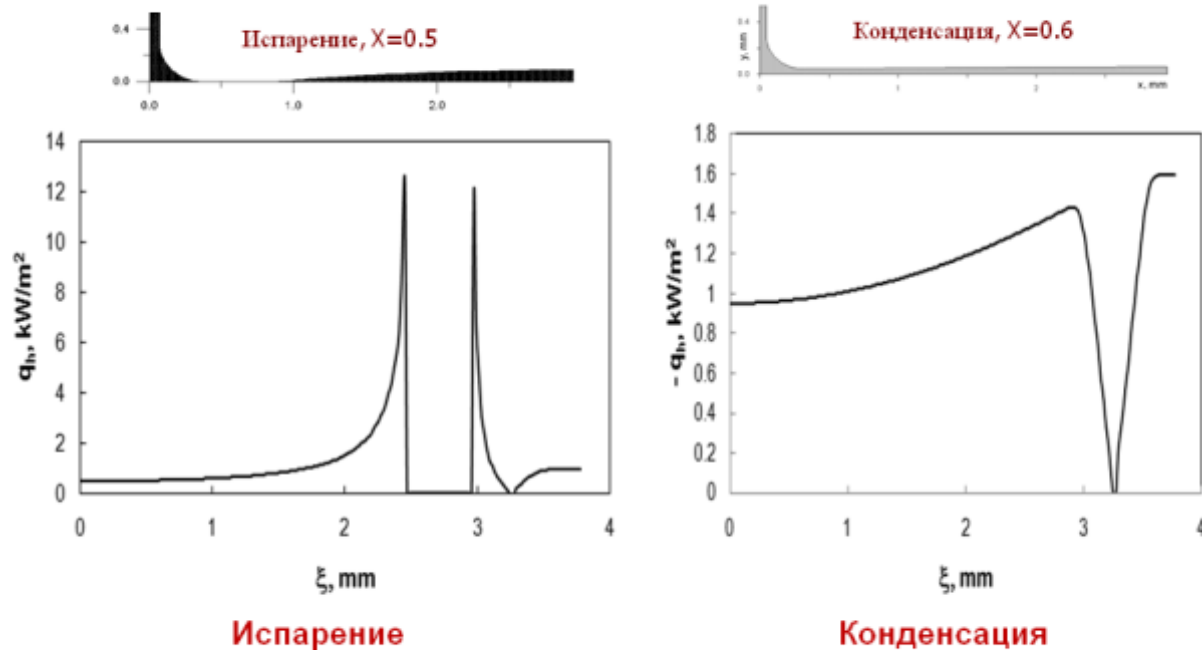


Схема определения границы раздела



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Расчеты локальных коэффициентов теплообмена для испарения и конденсации фреона R-21



Распределение локального теплового потока вдоль периметра канала $6.5 \times 1.05 \text{ мм}^2$ при массовой скорости $G=50 \text{ кг/м}^2\text{с}$ и начальном паросодержании 0.4.



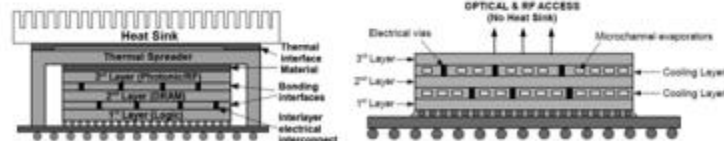
«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Отвод тепла от зон сверхвысокого тепловыделения

Способность оборудования отводить большие тепловые потоки - основной фактор при проектировании высокопроизводительных компьютерных процессоров, электронного оборудования, энергетических реакторов, мощных лазеров: ориентир - **1000 Вт/см²**!



Mudawar, 2011



Системы отвода тепла, Koo J.M. et al., 2005

Микроканальные системы охлаждения - эффективное решение для отвода тепла от теплонпряженных источников, так как они имеют большую удельную поверхность и высокие коэффициенты теплоотдачи



РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ В МИКРОКАНАЛЕ

«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Трехчленная композитная модель $h^2 = (h_{\text{con}} F)^2 + (h_{\text{boil}} \Psi_{\text{sup}} S)^2 + (h_{\text{ev}} E)^2$

$$F = \left[1 + x \text{Pr}_{\text{liq}} \left(\rho_{\text{liq}} / \rho_{\text{gas}} - 1 \right) \right]^{0.35} \quad S = \left(1 + 0.055 F^{0.1} \text{Re}_{\text{liq}0}^{0.16} \right)^{-1} \quad \Psi_{\text{sup}} = \left(\tanh^2 \left(2.5 \cdot 10^{-3} \Theta_{\text{sup}}^2 \right) (a-b) + 2b \right) / (a+b)$$

□ Ψ_{sup} – фактор подавления кипения в тонкой пленке, Kuznetsov (2010):

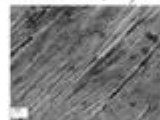
$$\Theta_{\text{sup}} = \left(y_{\text{vis}} / d_{\text{tan}} \right)^{0.6} / \left(Bo_x^{0.4} We^{-0.08} \text{Pr}^{1/3} \right) \quad y_{\text{vis}} = 5 v_{\text{liq}} / \sqrt{\tau_w / \rho_{\text{liq}}}$$

□ **Вынужденная конвекция** Shah and London (1978) :

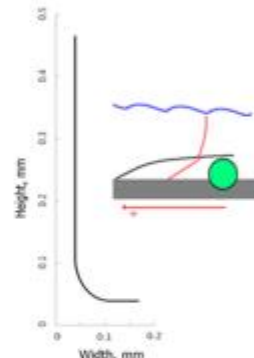
$$\text{Nu}_{\text{con}} = 8.235 \cdot (1 - 2.0421\gamma + 3.0853\gamma^2 - 2.4765\gamma^3 + 1.0578\gamma^4 - 0.1861\gamma^5)$$

□ **Пузырьковое кипение** Saiz Jabardo et al. (2009):

$$h_{\text{boil}} = 100 q^m (P/P_{\text{cr}})^{0.45} (-\lg(P/P_{\text{cr}}))^{-0.80} Ra^{0.2} M^{-0.5}$$

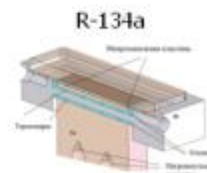
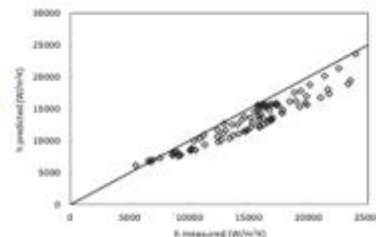
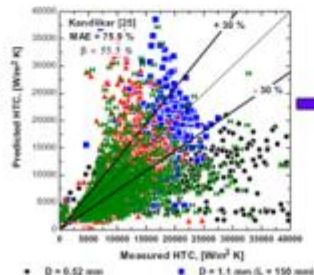


□ **Теплоотдача для турбулентной пленки жидкости**



$G=200 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $x=0.27$

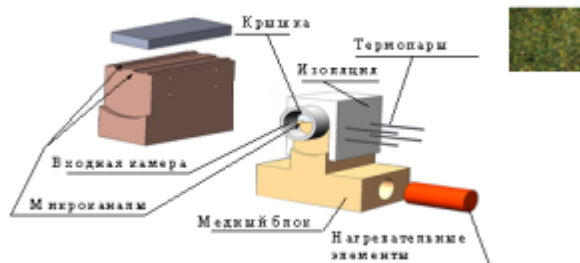
Сравнение расчета и эксперимента по модели Kandlikar, 2004



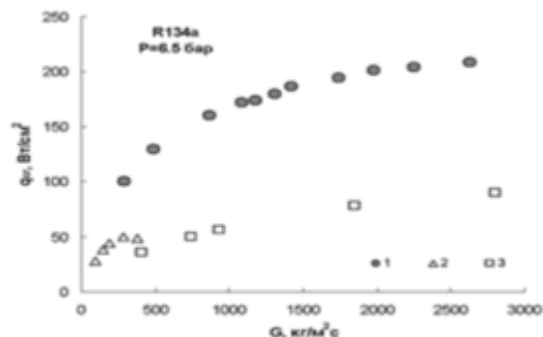


«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

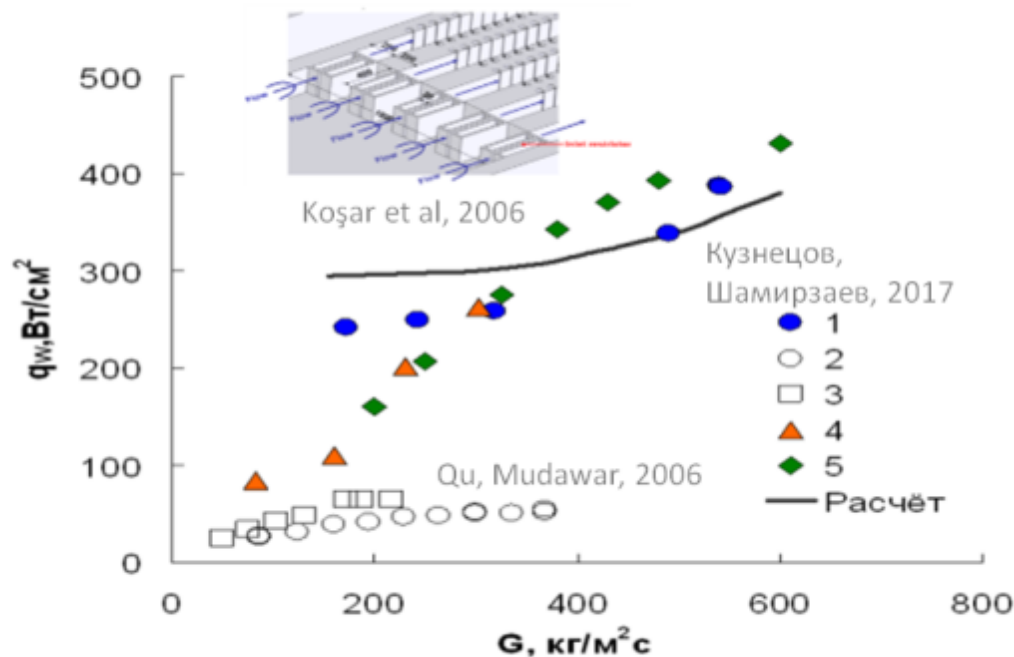
МИКРОКАНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТВОДА ТЕПЛА



Медный блок, зазор 300 мкм



Насыщенный хладон R-134a



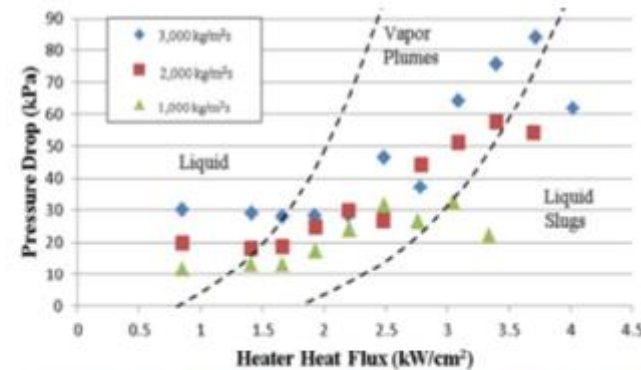
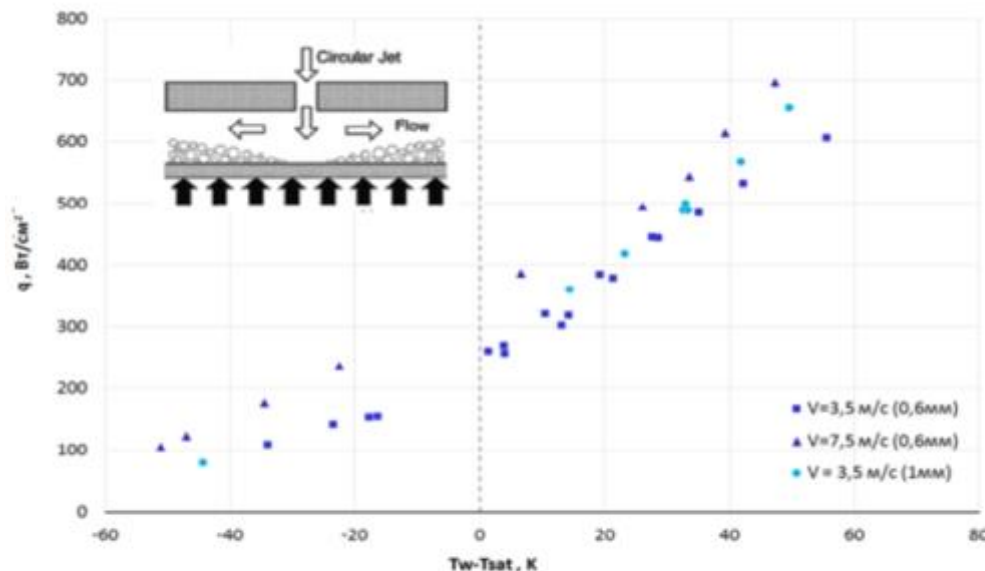
Вынужденная конвекция воды в условиях недогрева

Процессы теплообмена при фазовых и химических превращениях в микроканальных системах.



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

МИКРОСТРУЙНЫЙ ОТВОД ТЕПЛА ОТ ЗОН ВЫСОКОГО ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ



R134a, зазор $10 \mu m$, Nasr et al, 2017

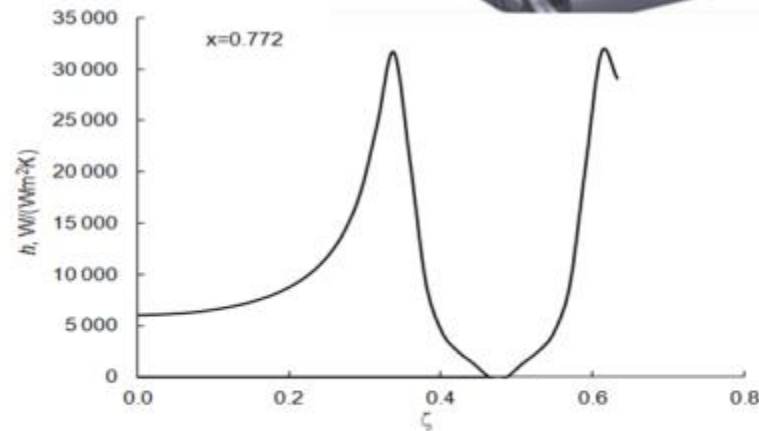
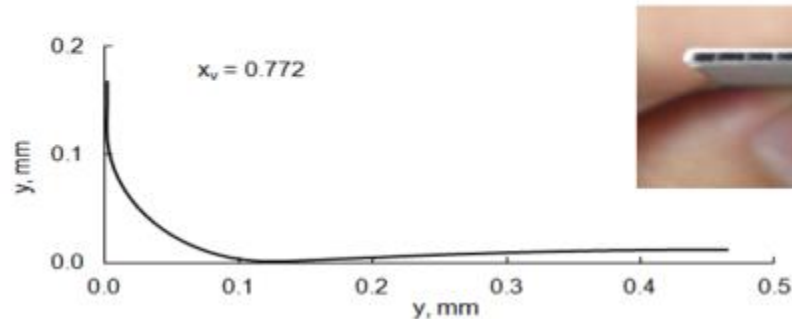
Микроструйное охлаждение с недогревом и микроканальное охлаждение

Процессы теплообмена при фазовых и химических превращениях в микромерных системах.



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

ТЕПЛОБМЕН ПРИ КОНДЕНСАЦИИ В МИКРОКАНАЛЕ



Форма межфазной поверхности и локальный коэффициент теплоотдачи при конденсации в микроканале 335x930 μm для массовой скорости 481 kg/m²s и $x_v = 0.772$



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Водородная энергетика (топливные элементы)



Переход к «зеленой экономике»

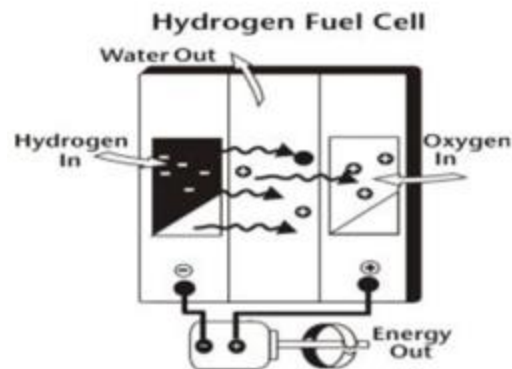
Водородная энергетика включает следующие технологии:

- крупномасштабное производство водорода из ископаемых, синтетических и возобновляемых источников энергии;
- производство топливных элементов и энергоустановок на их основе;
- использование H_2 для получения энергии в промышленности, на транспорте, в быту.



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

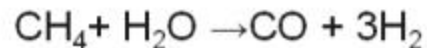
Производство водорода для перспективных энергетических систем



Топливный процессор на основе микро/нанотехнологий, интегрированный с топливным элементом имеет высокий потенциал в водородной энергетике



Паровая конверсия метана



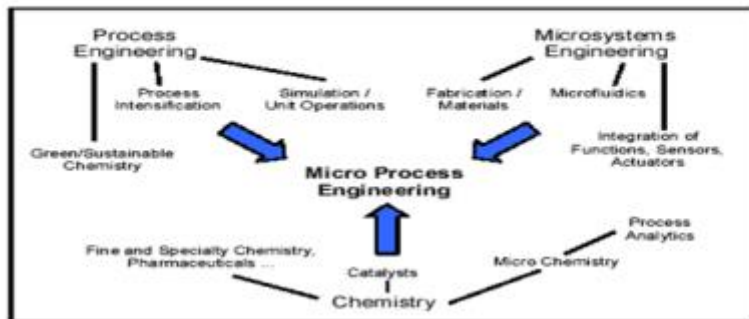
Паровая конверсия пропан-бутана





«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

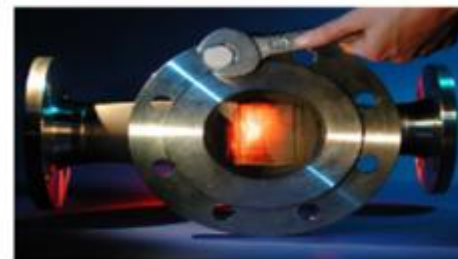
Физико-химические превращения в микро- и наноразмерных системах



Наноразмерный катализатор в микроканале



Концепция минизавода

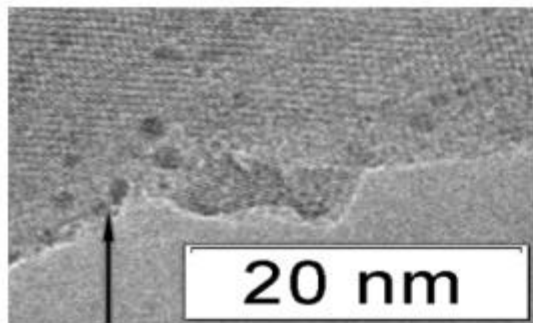


Процессы теплообмена при фазовых и химических превращениях в микро- и наноразмерных системах.

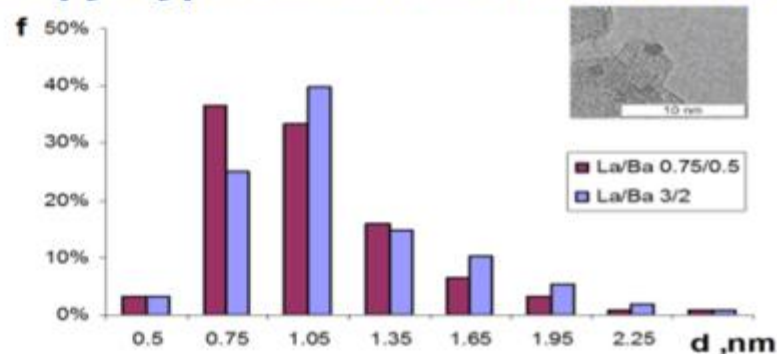


«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Каталитические наноструктуры на основе Rh/Pd/Ce/Cr/La

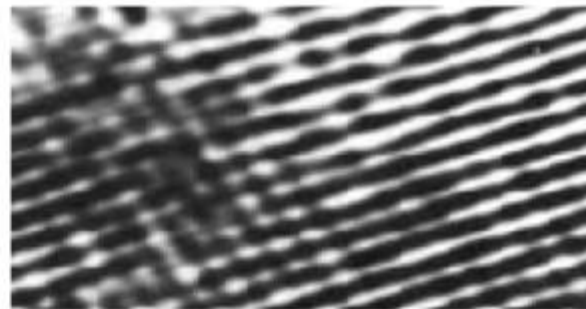


Наночастицы родия



Распределение наночастиц катализатора по размеру

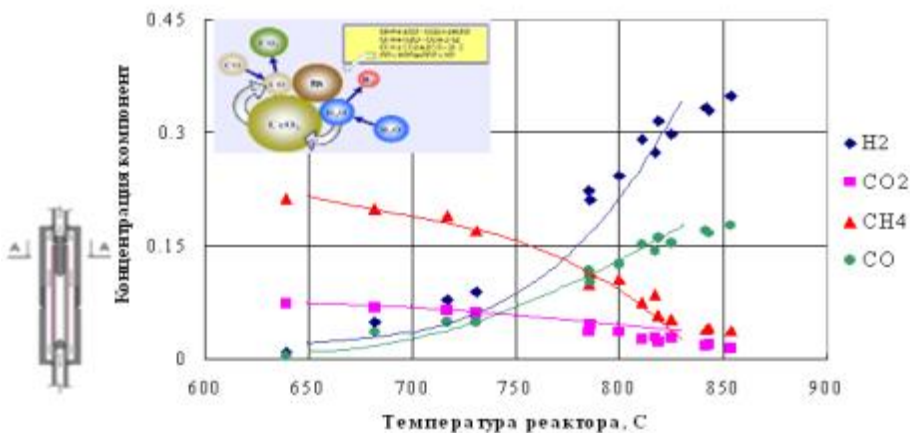
Наночастицы катализатора Rh с размером менее 10 нм характеризуются повышенной поверхностной энергией, координационной ненасыщенностью и большой поглощающей способностью





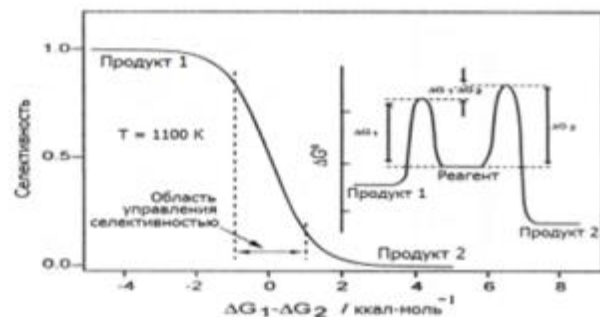
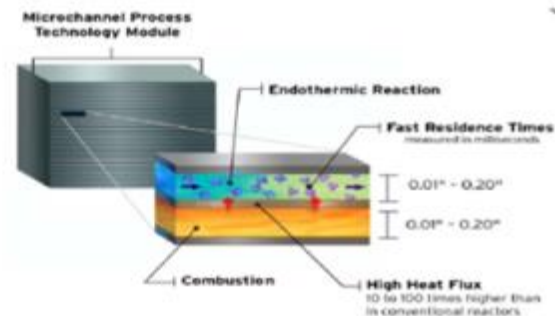
«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Химические реакции с высокой селективностью на синтезированных наноструктурах



Продукты конверсии неполного окисления метана воздухом, микроканал с зазором 900 μm , длина 0,04 м. Точки показывают экспериментальные данные, линии - результаты расчета.

Разработаны методы управления последовательностью химических реакций с образованием водорода в микроканалах





«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Моделирование реакций конверсии в микроканалах

Уравнения NS в переменным завихренность-функция тока

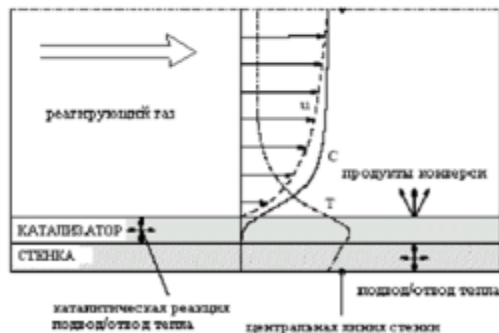
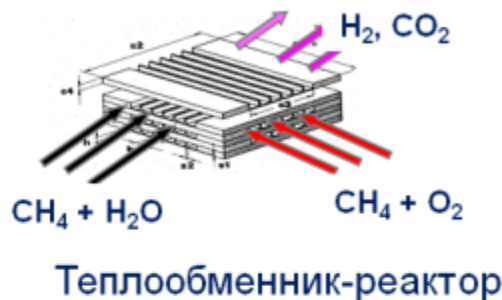


Схема течения

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) + \omega = 0$$

$$P = \frac{\rho R_m T}{M}, \quad M = \frac{1}{\sum Y_i / M_i}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \omega \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \omega \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial y} \frac{\partial (U^2 + V^2)}{\partial x} - \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial (U^2 + V^2)}{\partial y} \right) = \\ & = \frac{\partial^2}{\partial x^2} (\mu \omega) + \frac{\partial^2}{\partial y^2} (\mu \omega) - 2 \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \mu}{\partial y} \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\partial \mu}{\partial x} \frac{\partial U}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \mu}{\partial y} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{\partial \mu}{\partial x} \frac{\partial V}{\partial y} \right) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho U h)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V h)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum h_i \rho D_{im} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\sum h_i \rho D_{im} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right) + \\ & + U \frac{\partial P}{\partial x} + V \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right)^2 \end{aligned}$$

$$\frac{\partial(\rho U Y_i)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V Y_i)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_{im} \frac{\partial Y_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_{im} \frac{\partial Y_i}{\partial y} \right)$$

Граничные условия

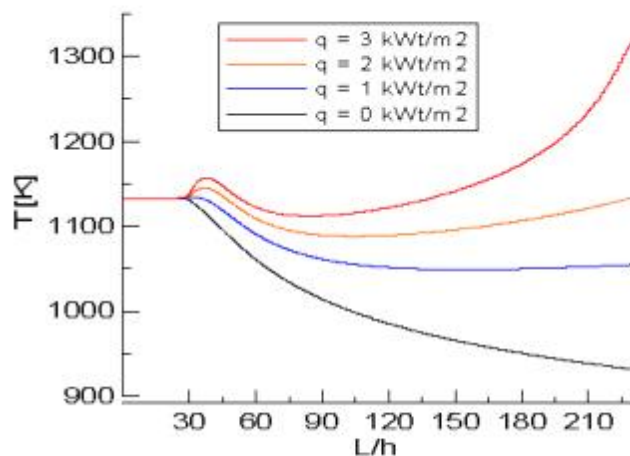
$$-\rho D \frac{\partial Y_i}{\partial y} = s_i M_i, \quad \lambda_* \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=1+0} - \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=1-0} = \sum_{k=1}^{K-k} r_k \Delta H_k$$

I - число компонент, k - число реакций

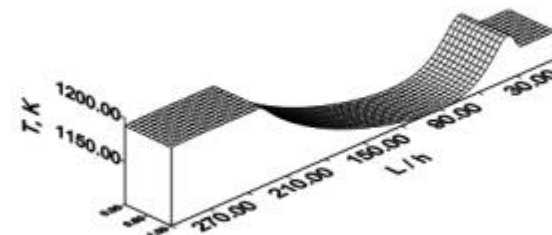


«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Поле температуры при паровой конверсии метана



Распределение температуры на оси реактора
($Re=3.33$, $Sc=0.92$, $Pr=0.915$, $Ma=0.00205$)



Поле температуры для плотности теплового потока 2.5 kW/m^2 .



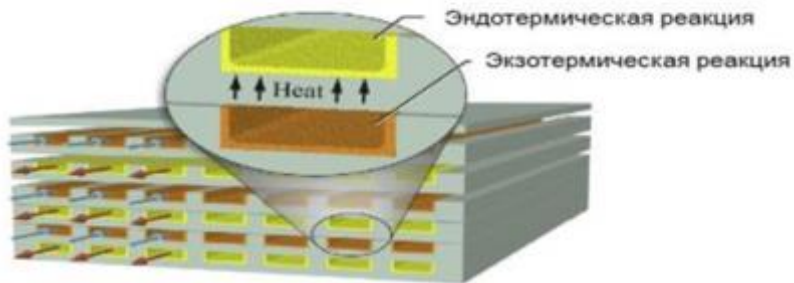
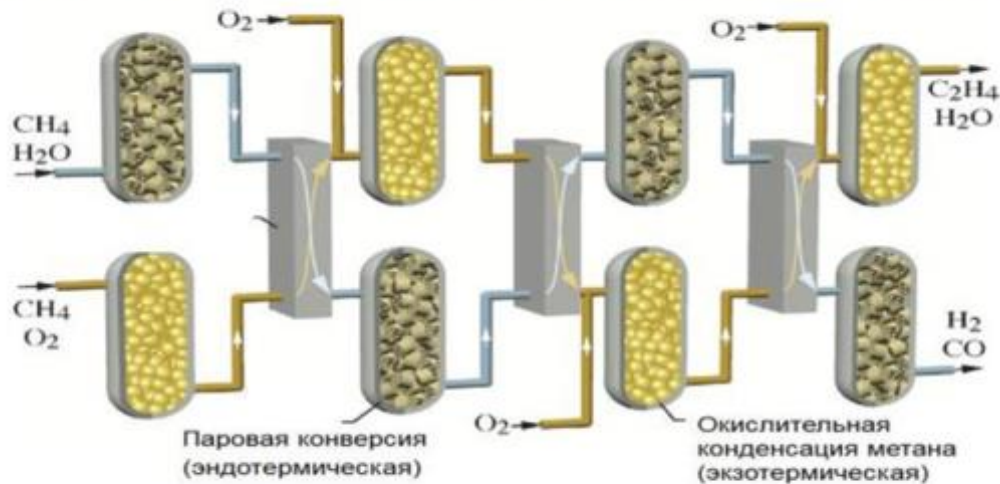
Микроканальный реактор паровой конверсии и горения метана.
Производительность по водороду 1200 l/h

Показана возможность контроля степени превращения метана в водород с изменением теплового режима катализатора при интенсивном теплопереносе в микроканале



«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Интегрированные реакторы-теплообменники





«Альтернативная и интеллектуальная энергетика»

Заключение

Установлено большое разнообразие многомасштабных механизмов интенсификации фазовых и химических превращений в современных микроструктурных и микроканальных аппаратах с двухфазными средами.

Они проявляются:

- в перераспределении жидкости по периметру канала
- интенсивном теплообмене в области линии смачивания
- подавлении кипения в сверхтонких пленок жидкости
- устранении диффузионных ограничений на скорость химических превращений и протеканием реакций в кинетическом режиме

Предложены эффективные методы управления процессами фазовых переходов и химическими реакциями при микроструктурировании поверхностей теплообмена и их модификации с использованием нанотехнологий

Использование микроструктурных и микроканальных тепломассообменных аппаратов позволяет значительно уменьшить габариты и увеличить производительность оборудования, реализовывать ранее недоступные технологии



Спасибо за внимание