



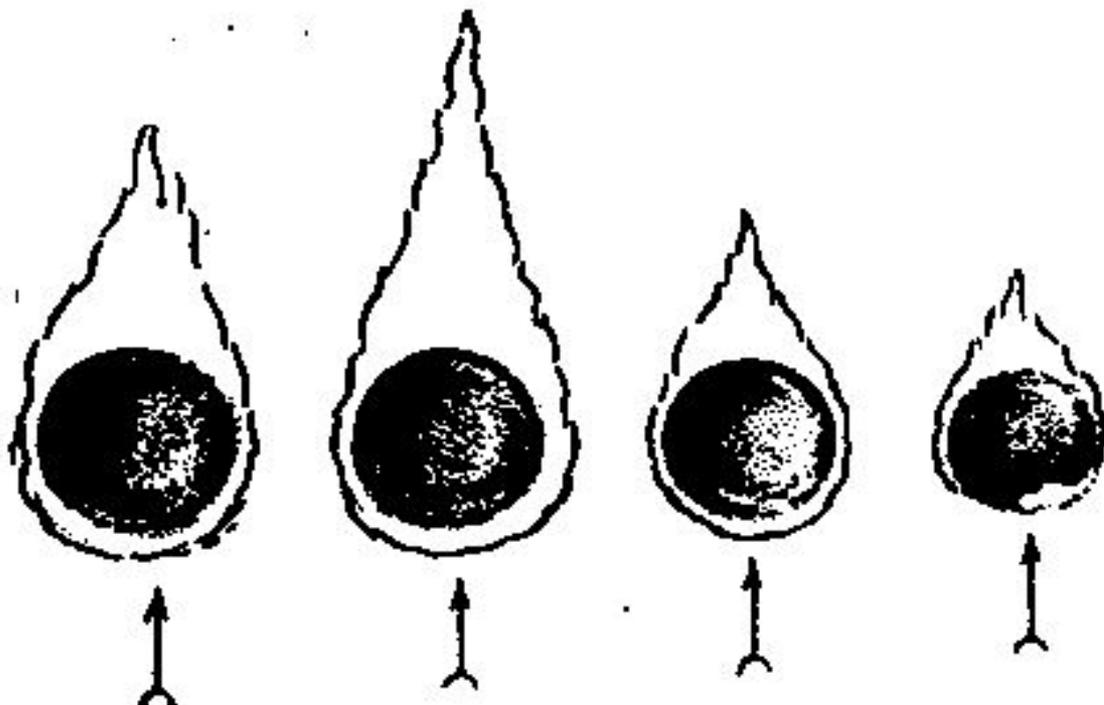
# Топливо и его использование

*Лекция 12.*

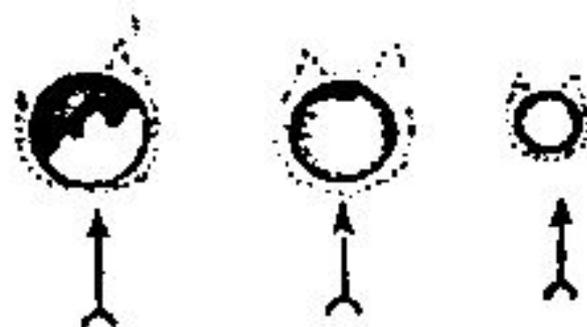
*Горение твёрдого топлива*

# Горение мелкой частицы твердого топлива (по Г.Ф.Кнорре)

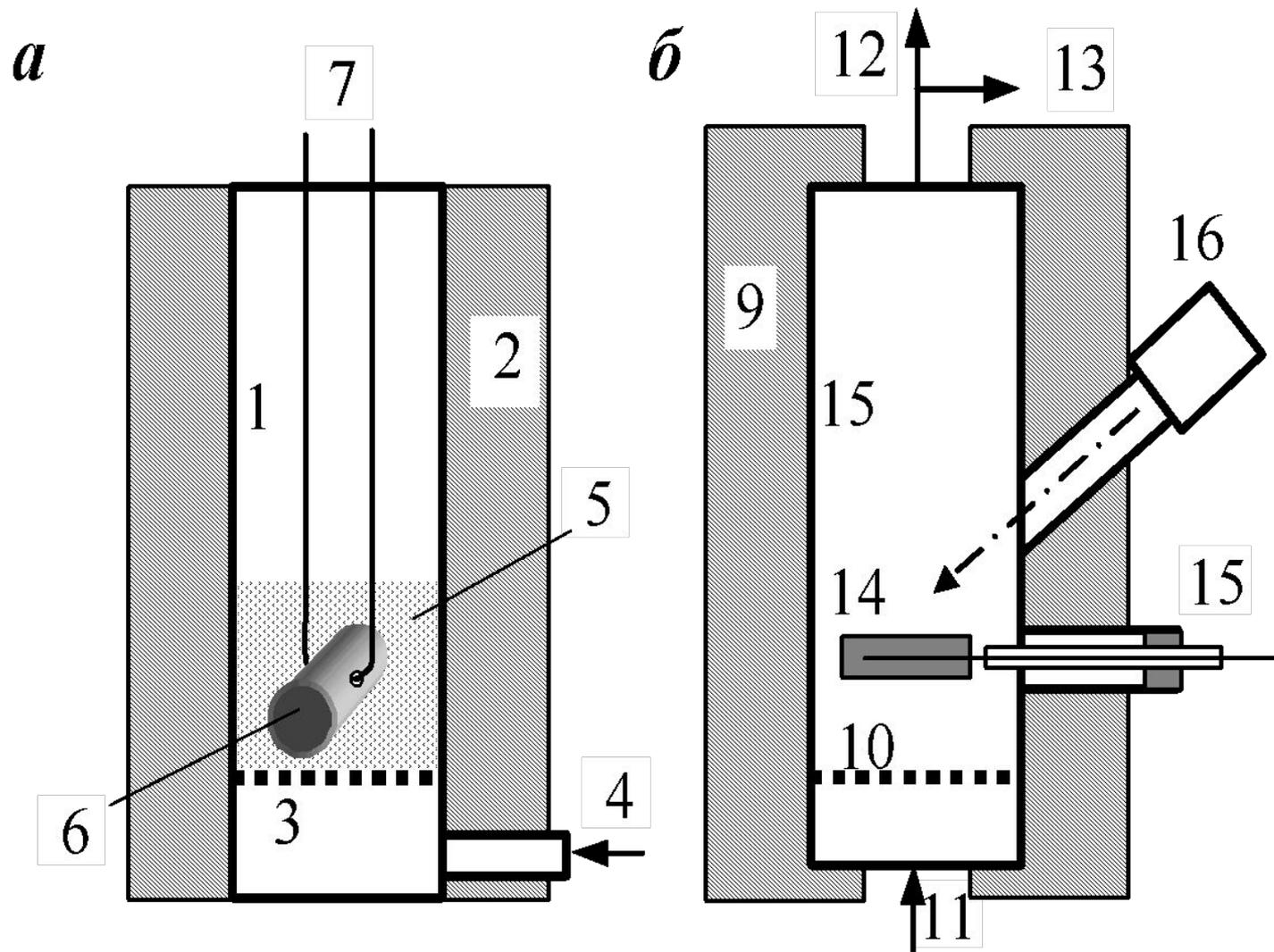
Диффузионное пламя летучих



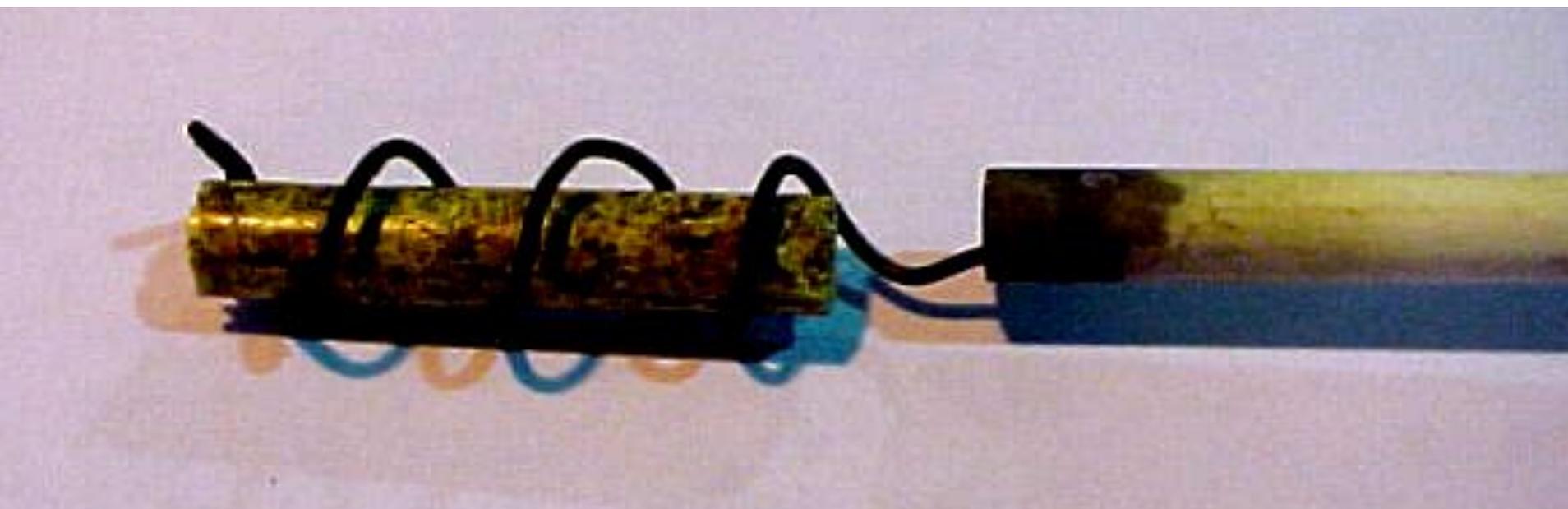
Диффузионное  
пламя СО



# Схема измерения температуры гранулы в КС (а) и в воздушном потоке (б)



# Древесная гранула перед исследованием механизма её горения

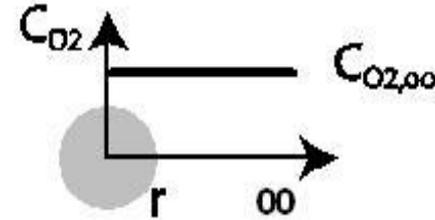
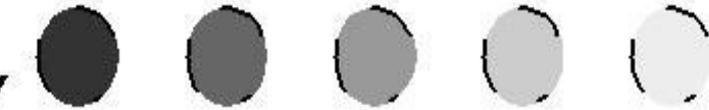


# Упрощённые схемы горения частицы твёрдого топлива

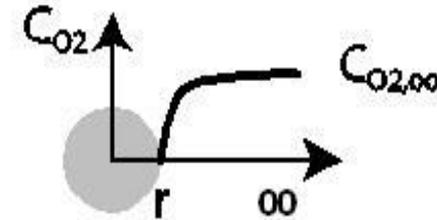
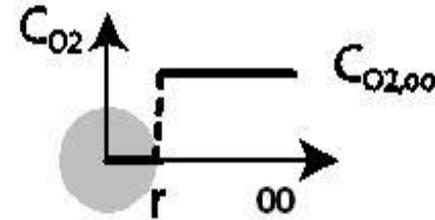
кинетическая  
область горения

диффузионная  
область

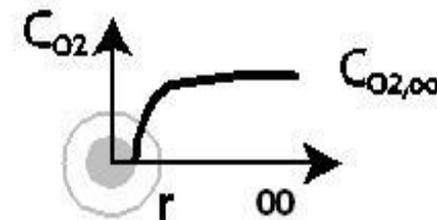
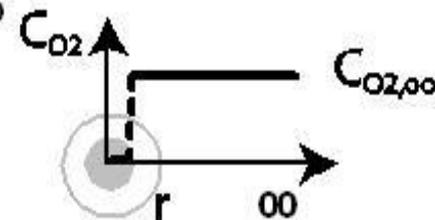
Постоянный размер, уменьшение плотности



Постоянная плотность, уменьшение размера



Нереагирующее ядро с постоянной плотностью



Время горения

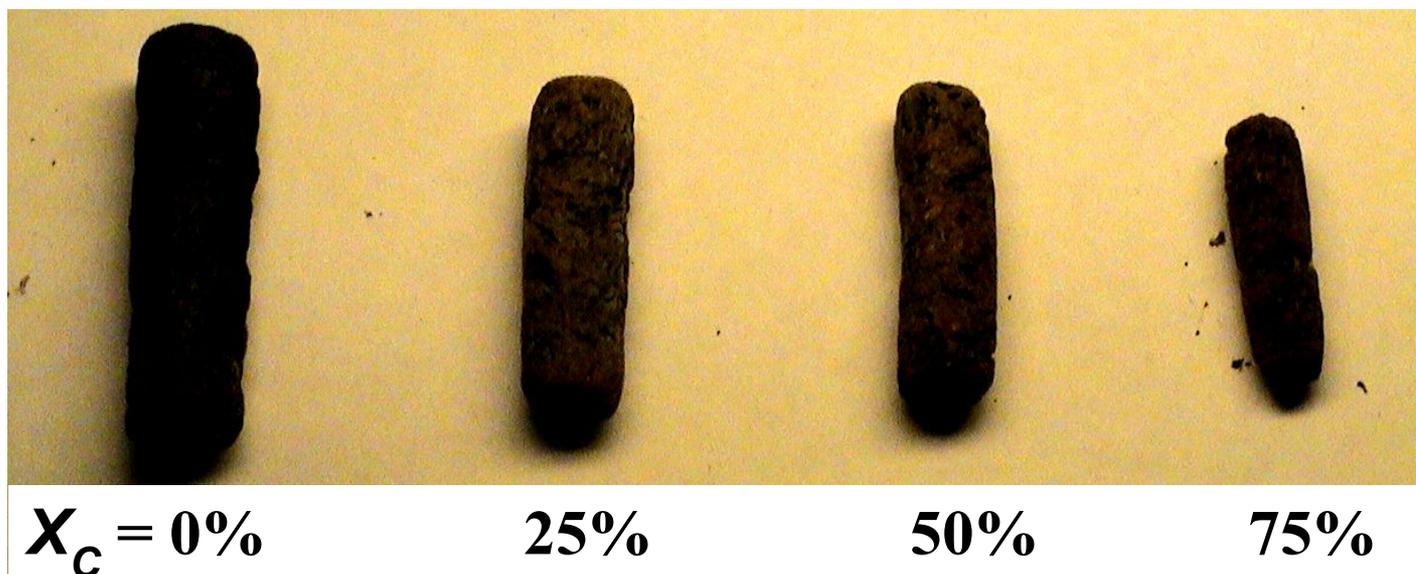


# Коксовый остаток древесных гранул

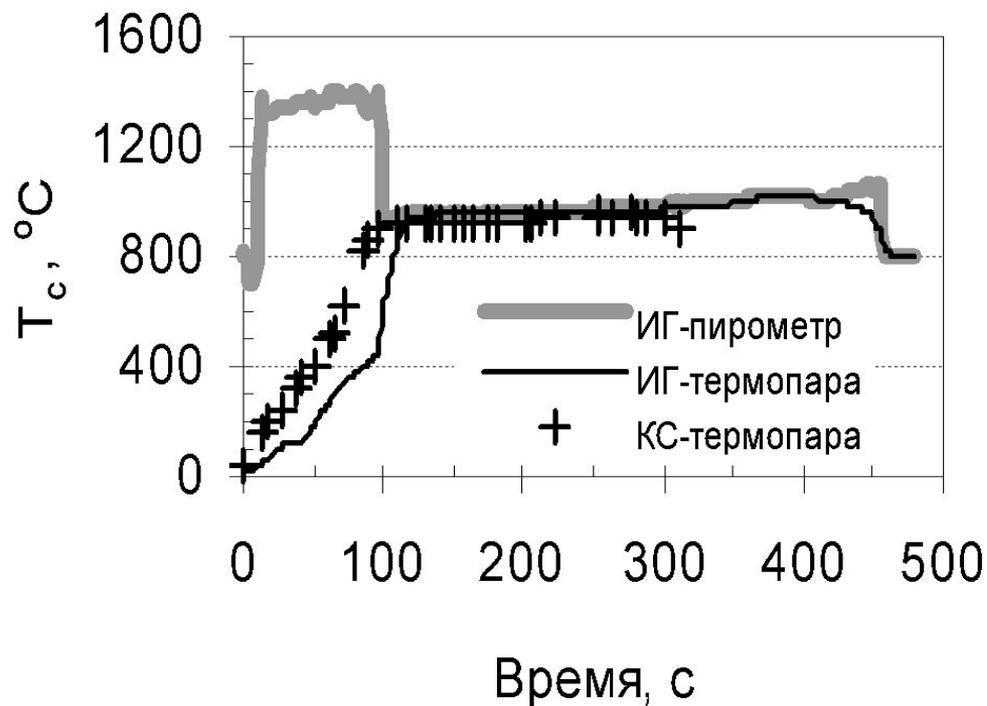


После выхода летучих,  $X_C = 0$

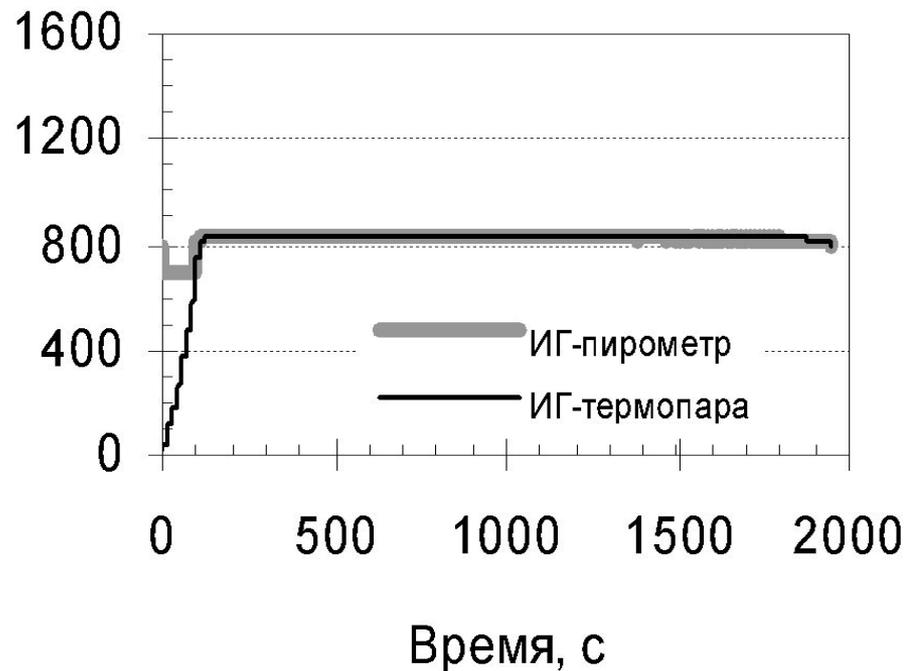
В процессе конверсии кокса  
 $X_C = (m_{C0} - m_C) / m_{C0}$  – степень конверсии



# Температура гранулы в кипящем слое (КС) и однофазном потоке (ИГ) при $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$

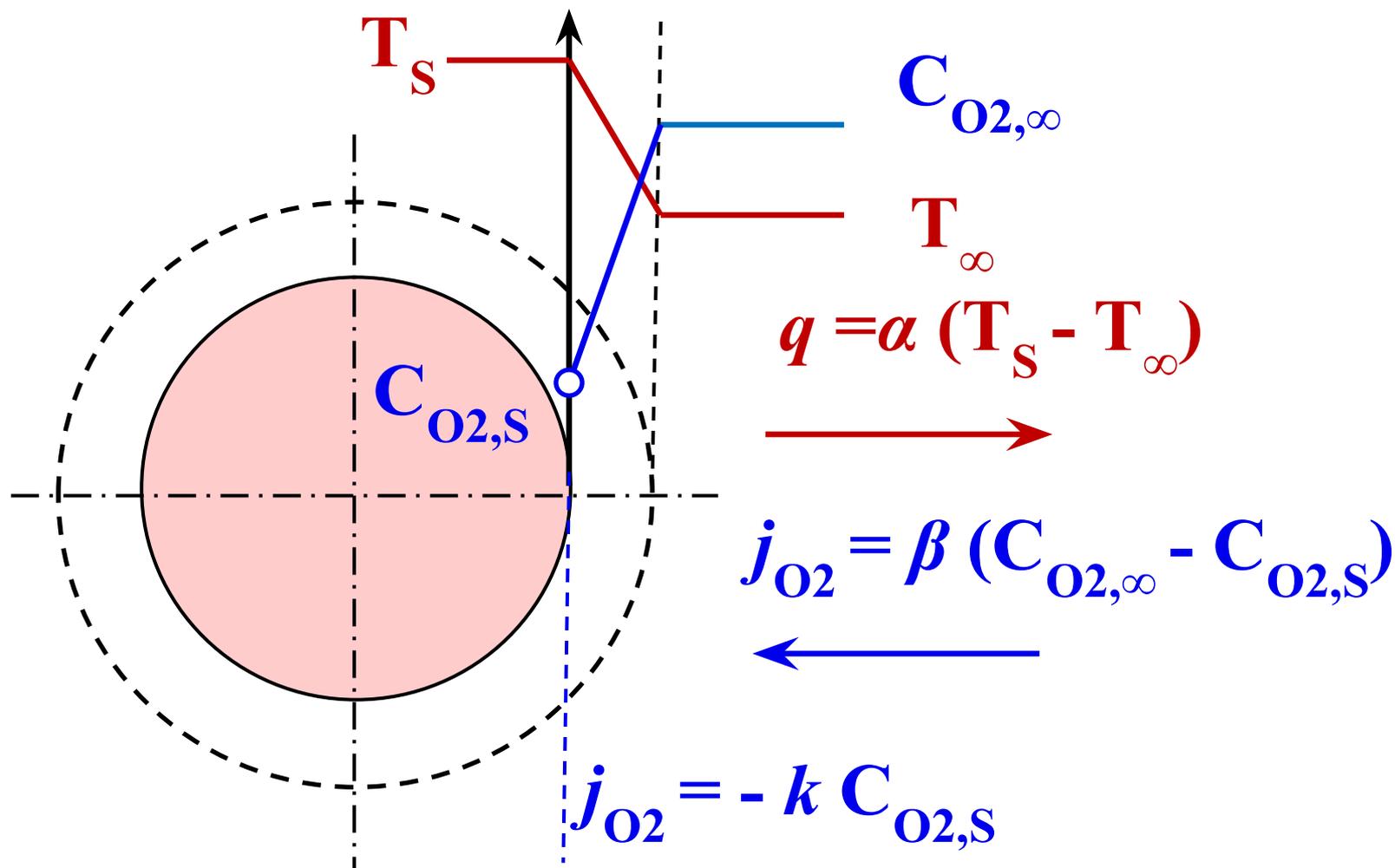


$C_{\text{O}_2} = 21\text{ об.}\%$

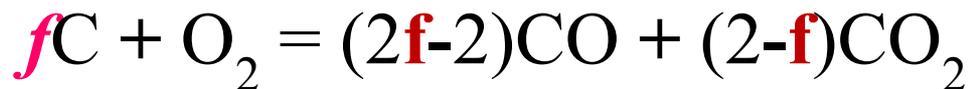


$C_{\text{O}_2} = 5\text{ об.}\%$

# Горение частицы коксового остатка по схеме сжимающейся сферы

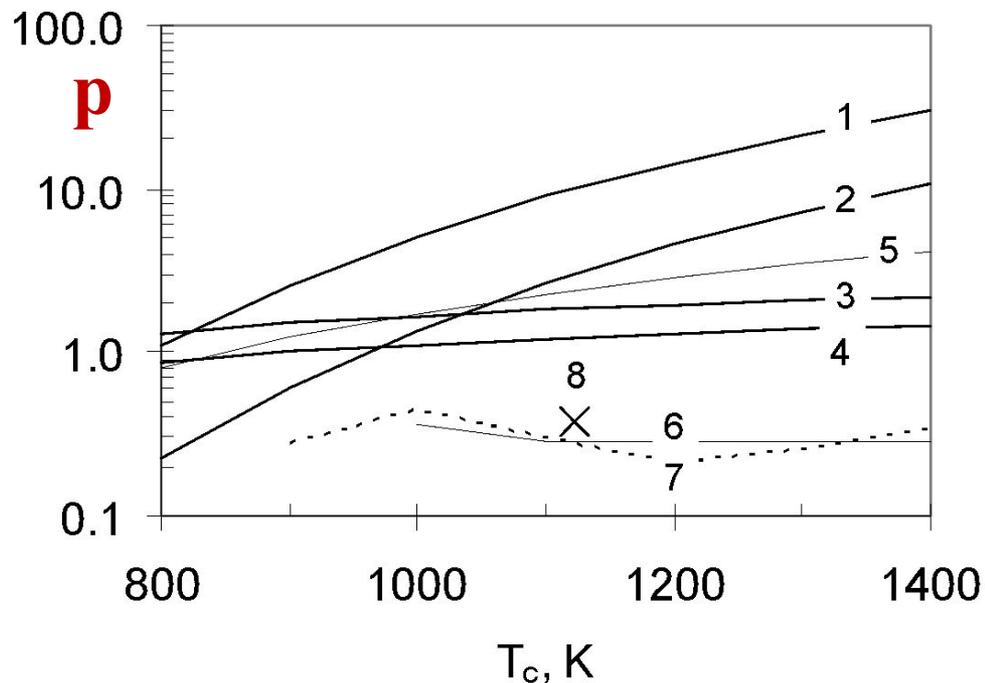
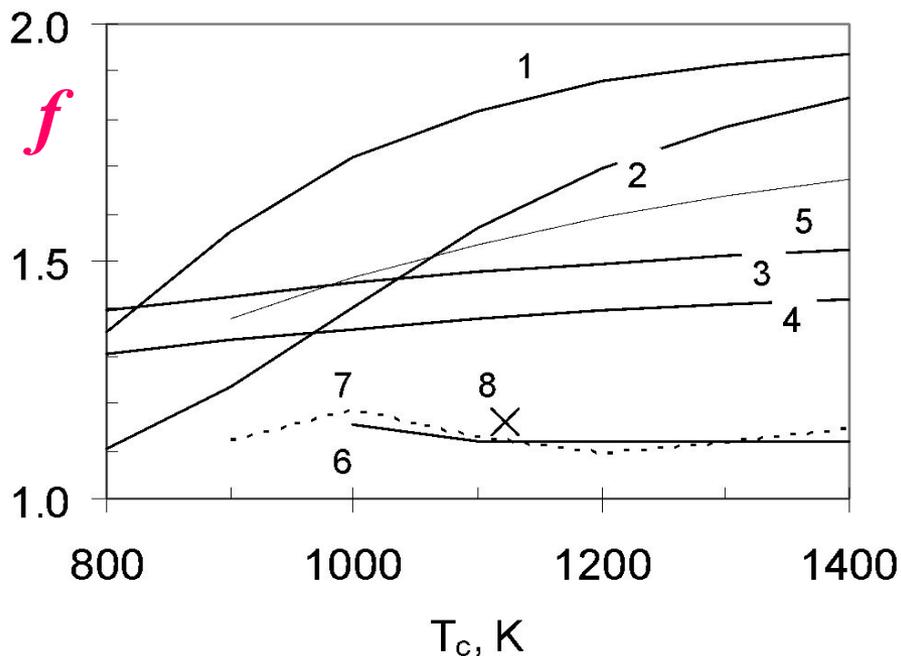


# Общая реакция горения углерода



$$f = \text{C}/\text{O}_2 \text{ (молярное отношение)}, \quad 1 \leq f \leq 2$$

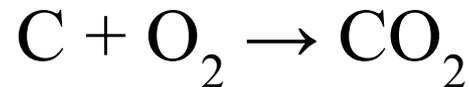
$$p = \text{CO}/\text{CO}_2 = (2f-2)/(2-f) = 1860 \exp(-7220/T_c) \quad (2)$$



1 – Артур, **2 – Россберг**, 3 – Вулис, 4 – Шестаков, 5 – Тоньотти, 6-8 – КС

## Упрощения:

– гетерогенная реакция 1-го порядка,  $f = 1$ ;



– горение углеродной *сферы* с начальным диаметром  $d_0$  и постоянной плотностью  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, скорость которого отнесена к внешней поверхности частицы

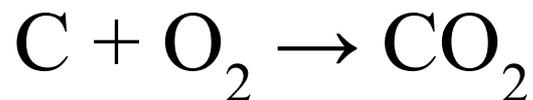
Постоянная плотность, уменьшение размера



$$-\frac{d}{d\tau} \left( \frac{\rho_c}{M_c} \frac{\pi d^3}{6} \right)_{\text{кмоль/с}} = k C_{\text{O}_2, S} (\pi d^2)$$

$$[k] = [k_0] = \text{м/с}; [C] = \text{кмоль/м}^3; [\rho] = \text{кг/м}^3; [M] = \text{кг/кмоль}$$

## Гетерогенная реакция 1-го порядка полного окисления углерода



$$-\frac{dn_{\text{O}_2}}{d\tau} = -\frac{dn_{\text{C}}}{d\tau} = kC_{\text{O}_2} F$$

Размерность константы скорости реакции и предэкспоненциального члена  $[k] = [k_0] = \text{м/с}$

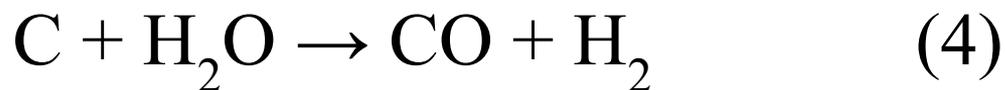
$F$  – площадь внешней поверхности частицы,  $\text{м}^2$

# Кинетика полного окисления углерода (по С,М, Шестакову)

| Топливо               | $E, \times 10^{-3}$ Дж/моль |
|-----------------------|-----------------------------|
| Древесный уголь       | 75 - 84                     |
| Торф                  | 85                          |
| Бурый уголь           | 90 - 105                    |
| Каменный уголь        | 115 - 135                   |
| Тощий уголь, антрацит | 140 - 146                   |
| Электродный уголь     | 167                         |

$$\lg k_0 = 0,2 \times 10^{-4} E + 2, \text{ м/с}$$

# Соотношение энергий активаций реакций горения и газификации углерода



$$E_2/E_1 = 1,1 \quad E_3/E_1 = 2,2 \quad E_4/E_1 = 1,6$$

**В стационарном режиме скорость расщедования кислорода на поверхности частицы равна потоку массы  $O_2$  к поверхности**

$$kC_{O_2,S} = \beta(C_{O_2,\infty} - C_{O_2,S}), \text{ кмоль/с}$$

$$C_{O_2,S}(k + \beta) = \beta C_{O_2,\infty} \Rightarrow C_{O_2,S} = \frac{\beta}{(k + \beta)} C_{O_2,\infty}$$

$$-\frac{d}{d\tau} \left( \frac{\rho_c}{M_c} \frac{\pi d^3}{6} \right) = kC_{O_2,S} (\pi d^2) = \frac{k\beta}{(k + \beta)} C_{O_2,\infty} (\pi d^2)$$

$$\frac{3\pi d^2}{6} \frac{dd}{d\tau} \qquad K = \frac{k\beta}{(k + \beta)} = \frac{1}{1/k + 1/\beta}$$

**Время горения частицы коксового остатка  $t_c$**

$$-\int_{d_0}^0 \frac{\rho_c}{2M_c C_{O_2,\infty}} dd = \frac{d_0 \rho_c}{2M_c C_{O_2,\infty}} = \int_0^{t_c} K d\tau = t_c \left( \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} K d\tau \right) = t_c \bar{K}$$

# Конвективный тепло- и массообмен сферы

Массоотдача, 1 сфера

$$\text{Sh} = 2 + 0.6 \text{Re}^{1/2} \text{Sc}^{1/3}$$

Теплоотдача, 1 сфера

$$\text{Nu} = 2 + 0.6 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}$$

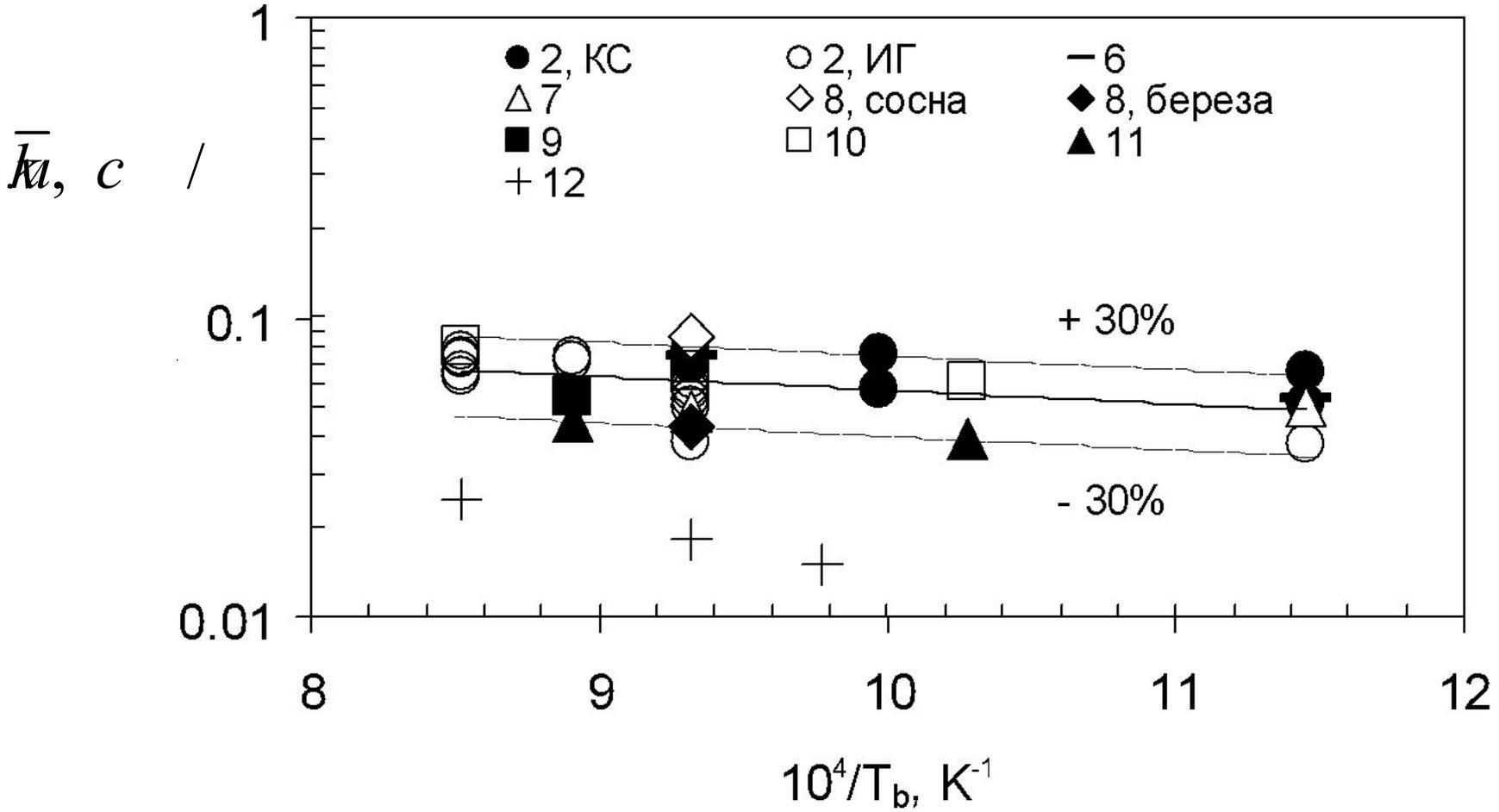
Плотный слой,  $\text{Re} > 80$

$$\text{Nu} = 2 + 1.8 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3}$$

$$\bar{T} = (T_s + T_\infty) / 2$$

Окончательно, время горения сферической частицы  
 коксового остатка

$$t_c = \frac{d_o \rho_c}{2M_c C_{O_2, \infty} \bar{k}}$$



Для **н**есферической частицы и **f** ≠ 1

$$t_c = \frac{X_o \rho_c}{2f M_c C_{O_2, \infty} \bar{k}}$$

где **X<sub>o</sub>** – наименьший размер частицы топлива (для древесины – поперёк волокон).

**f** – функция температуры горячей частицы, например,

$$(2f-2)/(2-f) = 1860 \exp(-7220/T_c)$$

# Температура горячей частицы коксового остатка

Уравнение баланса энергии горячей изотермической коксовой частицы имеет вид

$$\frac{d}{dt} \left( V \rho_c c_{p,c} T_c \right) = -k_o Y_{O_2} \rho_g F Q_{O_2} - \alpha (T_c - T_b) F$$

$c_{p,c}$ ,  $\rho_c$  – удельная теплоемкость и плотность кокса,

$Y_{O_2}$  – массовая доля кислорода в газе плотностью  $\rho_g$  вдали от частицы,

$Q_{O_2}$  – тепловой эффект реакции в расчете на кг кислорода, Дж/кг,

$T_c$ ,  $T_b$  – температуры частицы и окружающей среды, К

$\alpha$  – суммарный коэффициент теплоотдачи частицы, включающий радиационную составляющую, Вт/м<sup>2</sup>К,

$F$ ,  $V$  – площадь поверхности и объём частицы

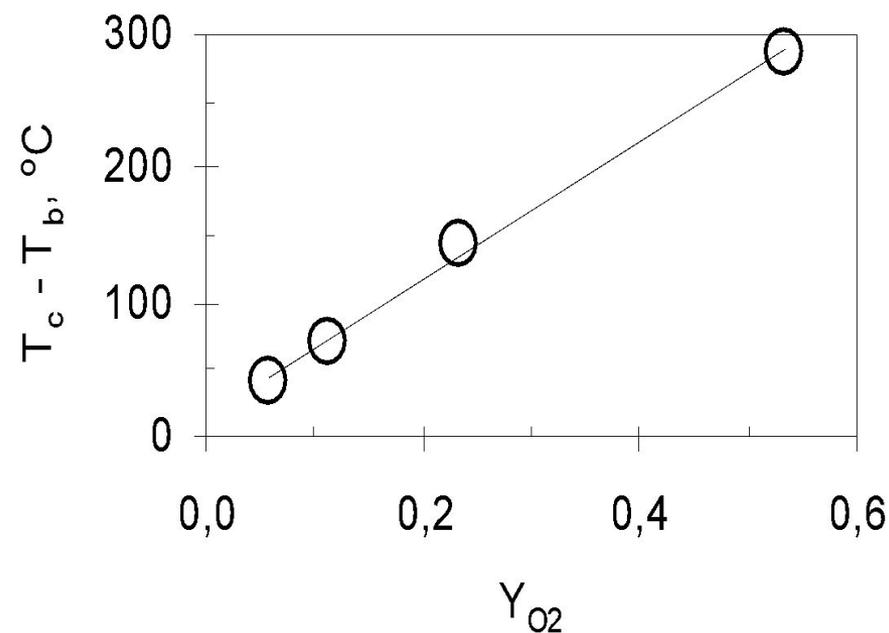
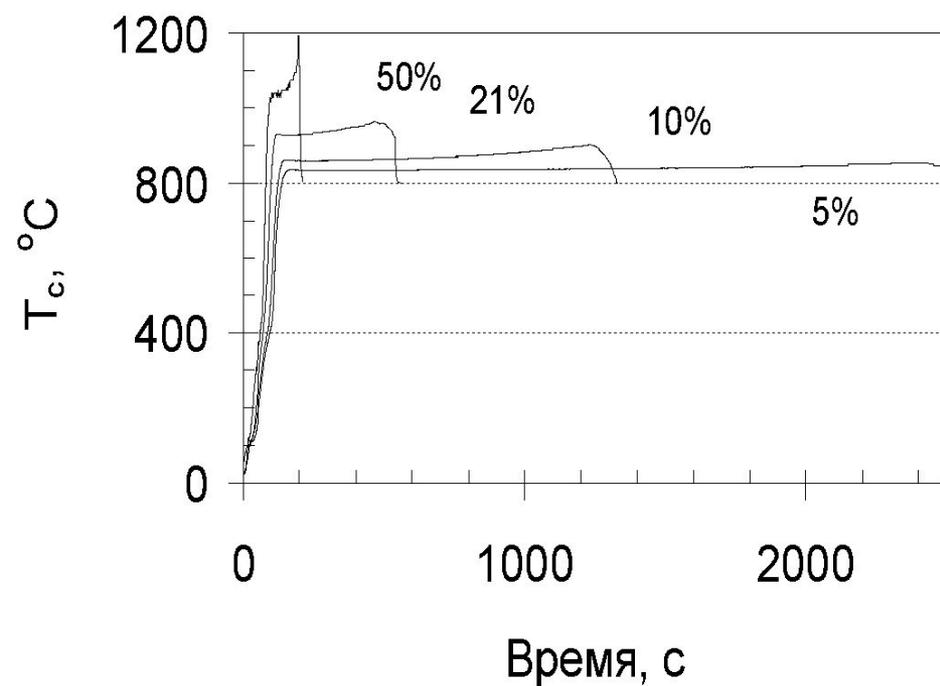
# Квазистационарная температура частицы

Экспериментальные данные показывают, что температура горячей частицы кокса быстро достигает максимального значения после выхода летучих и затем практически не меняется на протяжении всего процесса.

Это позволяет пренебречь нестационарным членом в левой части уравнения теплового баланса и получить *квазистационарную оценку* температуры горячей частицы и её перегрева относительно окружающей среды

$$T_c \approx T_b + \frac{k_o Y_{O_2} \rho_g Q_{O_2}}{\alpha}$$

# Перегрев коксового остатка др.гранулы относительно температуры реактора ( $T_b = 800\text{ }^\circ\text{C}$ )



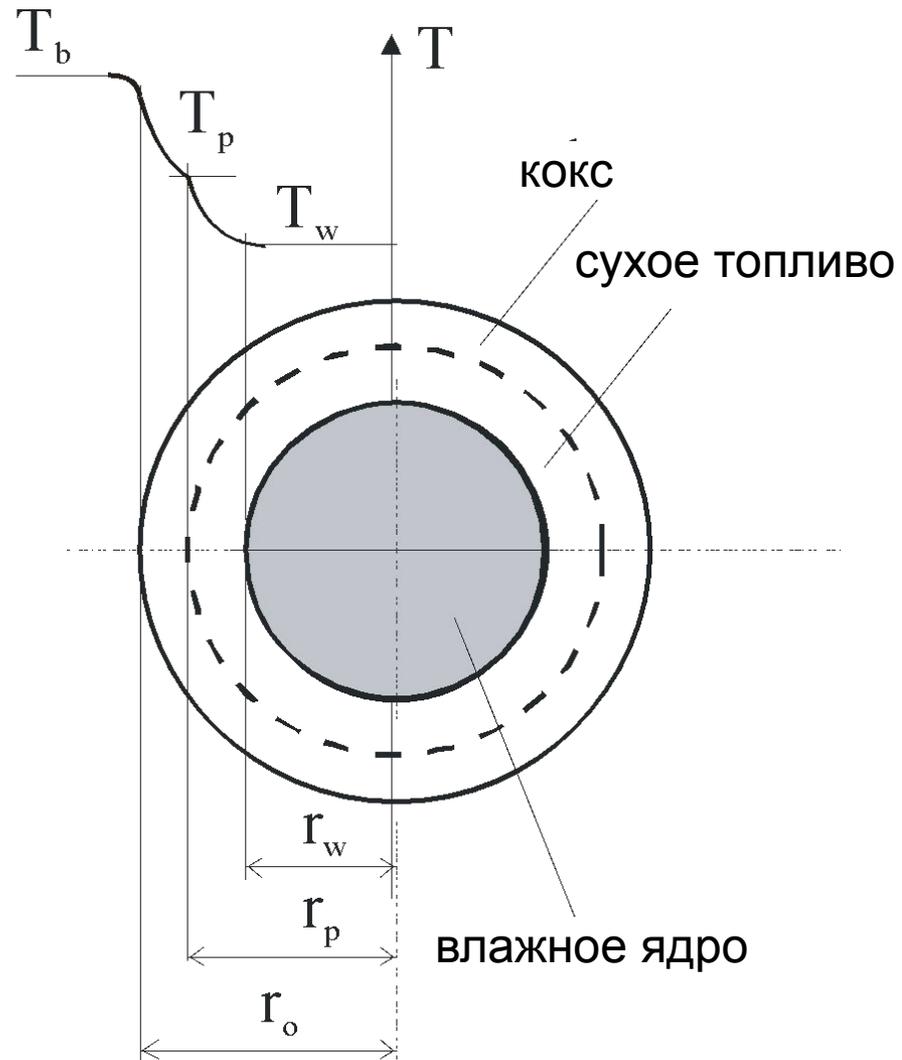
$$C_{O_2} = 21 \text{ об.}\%$$

$$C_{O_2} = 5 \text{ об.}\%$$

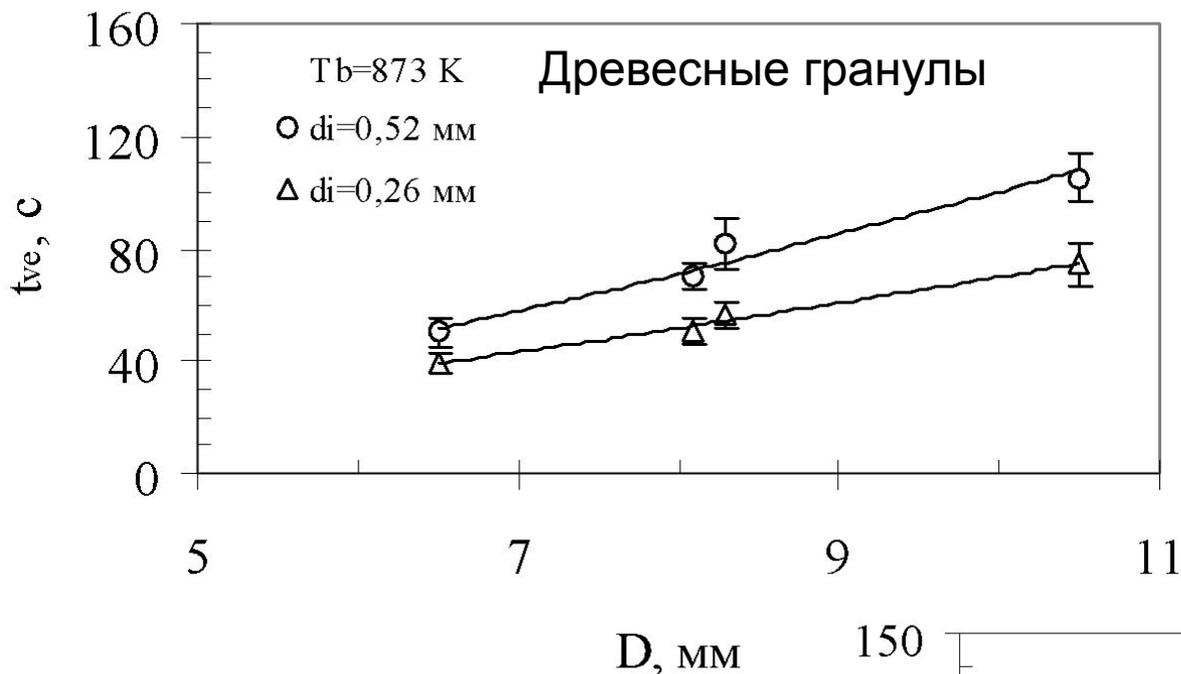
Процессы **сушки** и **пиролиза** крупной частицы ( $d \sim 0.01$  м) влажного топлива практически полностью перекрываются во времени, что позволяет принять  $t_{\text{сушки}} \approx t_{\text{в.л.}}$

Температура влажного ядра  $T_w \approx 100^\circ\text{C}$ ;

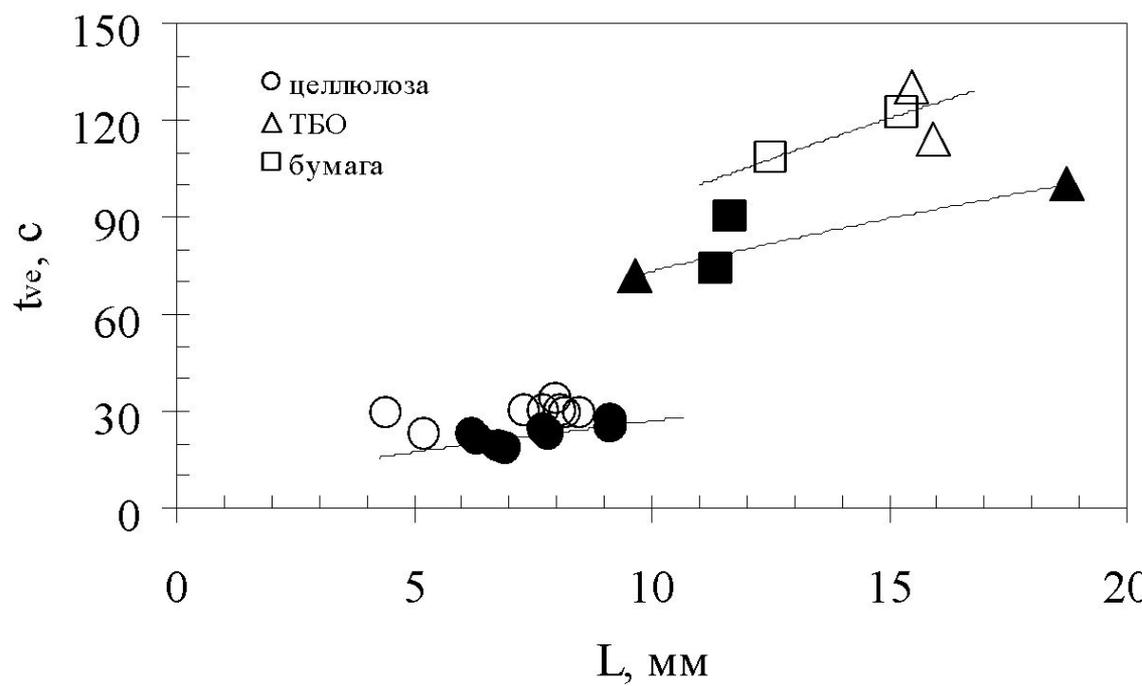
Температура пиролиза целлюлозы и гемицеллюлозы (70 % сухой массы древесины)  $T_p \approx 400^\circ\text{C}$ ,  
лигнина –  $T_p \approx 650^\circ\text{C}$ .



# Время выхода летучих из гранулы биотоплива в КС

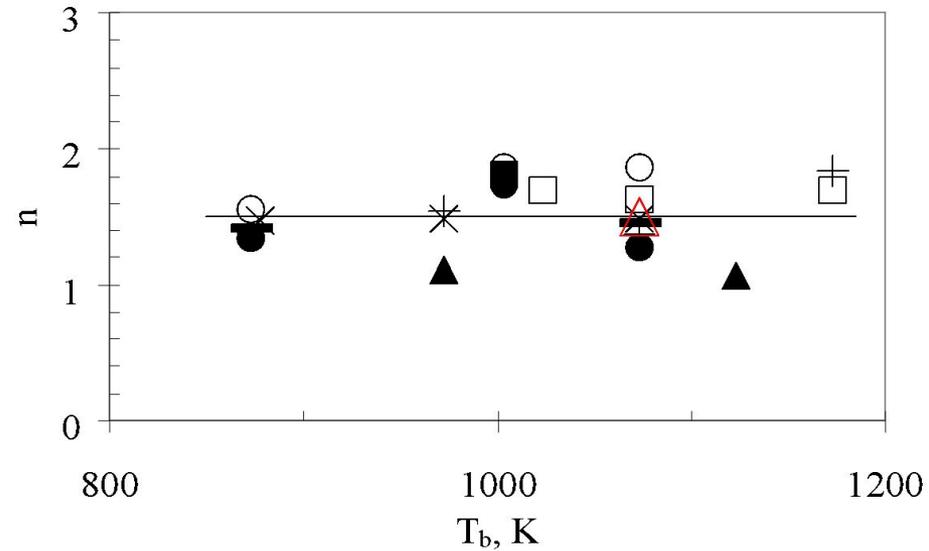
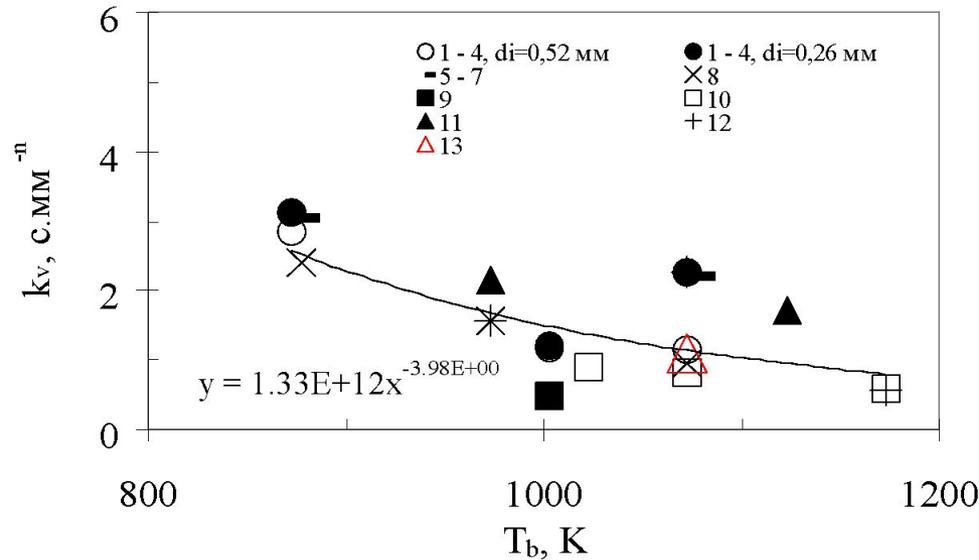


$$t_{\text{вых. лет.}} = k_v \cdot d^n$$



# Время выхода летучих из частицы топлива в КС

$$t_{\text{вых. летучих}} = k_v \cdot d^n$$



$$k_v = 1,3 \cdot 10^{12} \cdot T_{сл}^{-4}$$

$$n = 1,5$$

1-4 – древесные гранулы, 5-7 – гранулы ТБО, 8 – древесина, 9 – лигнин, 10 – торф, 11 – сланцы, 12 – нефтешлам, 13 – бурый уголь

# Горение древесной частицы



## Слоевое горение древесного угля (коксового остатка)



# Горение древесных гранул – верхнее зажигание



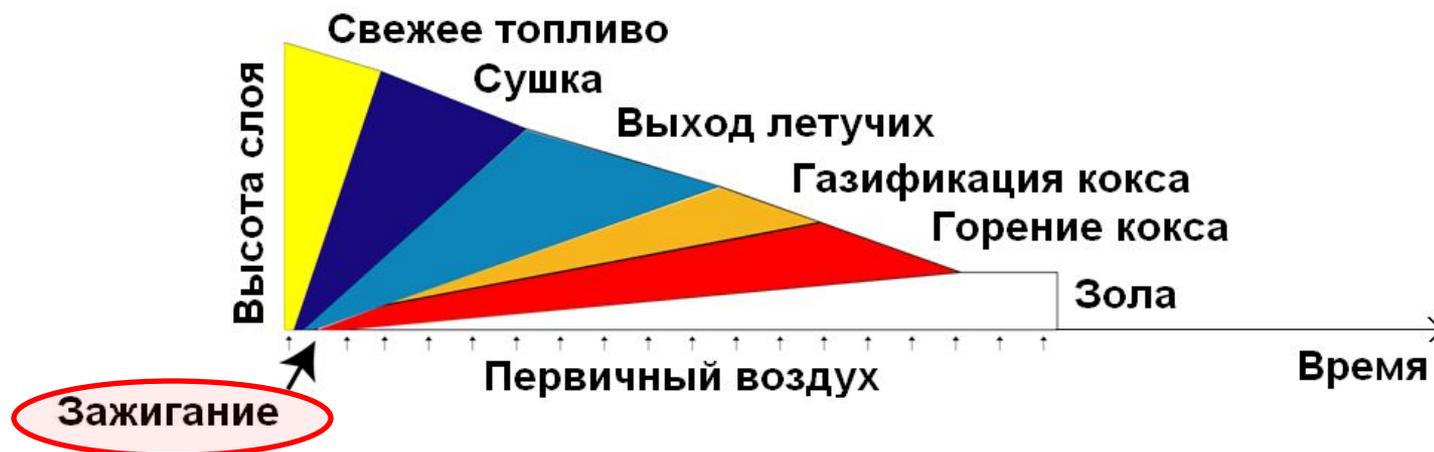
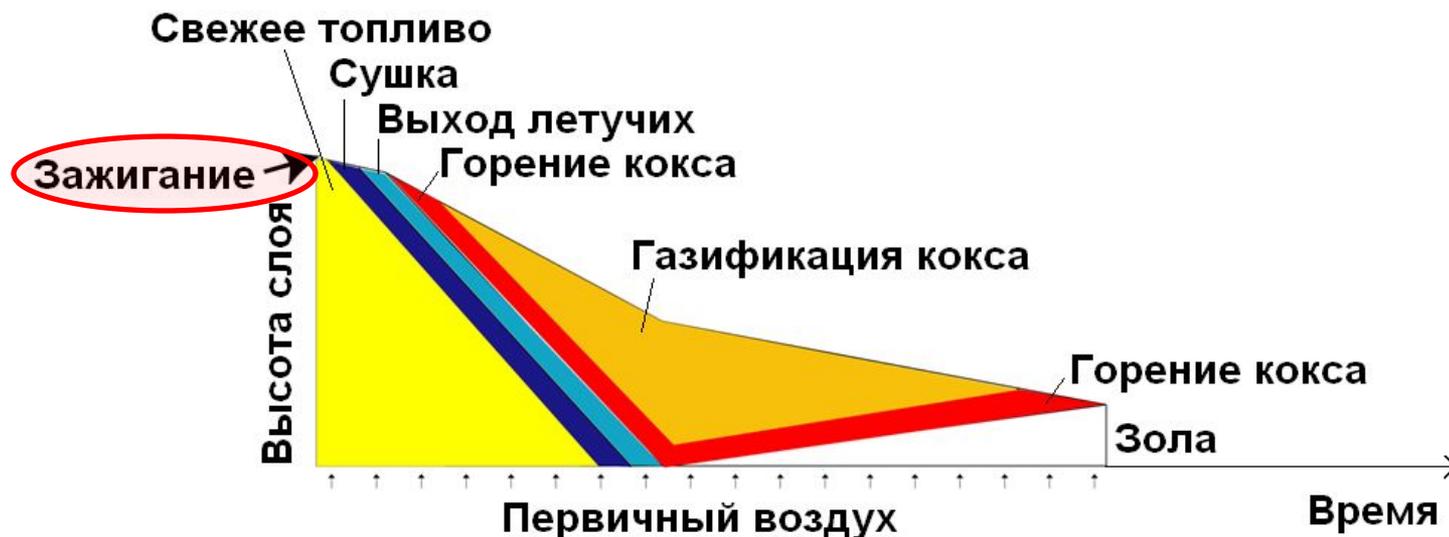
# Слоевая топка с наклонно-перекатывающей решеткой (Хотаб, Швеция)



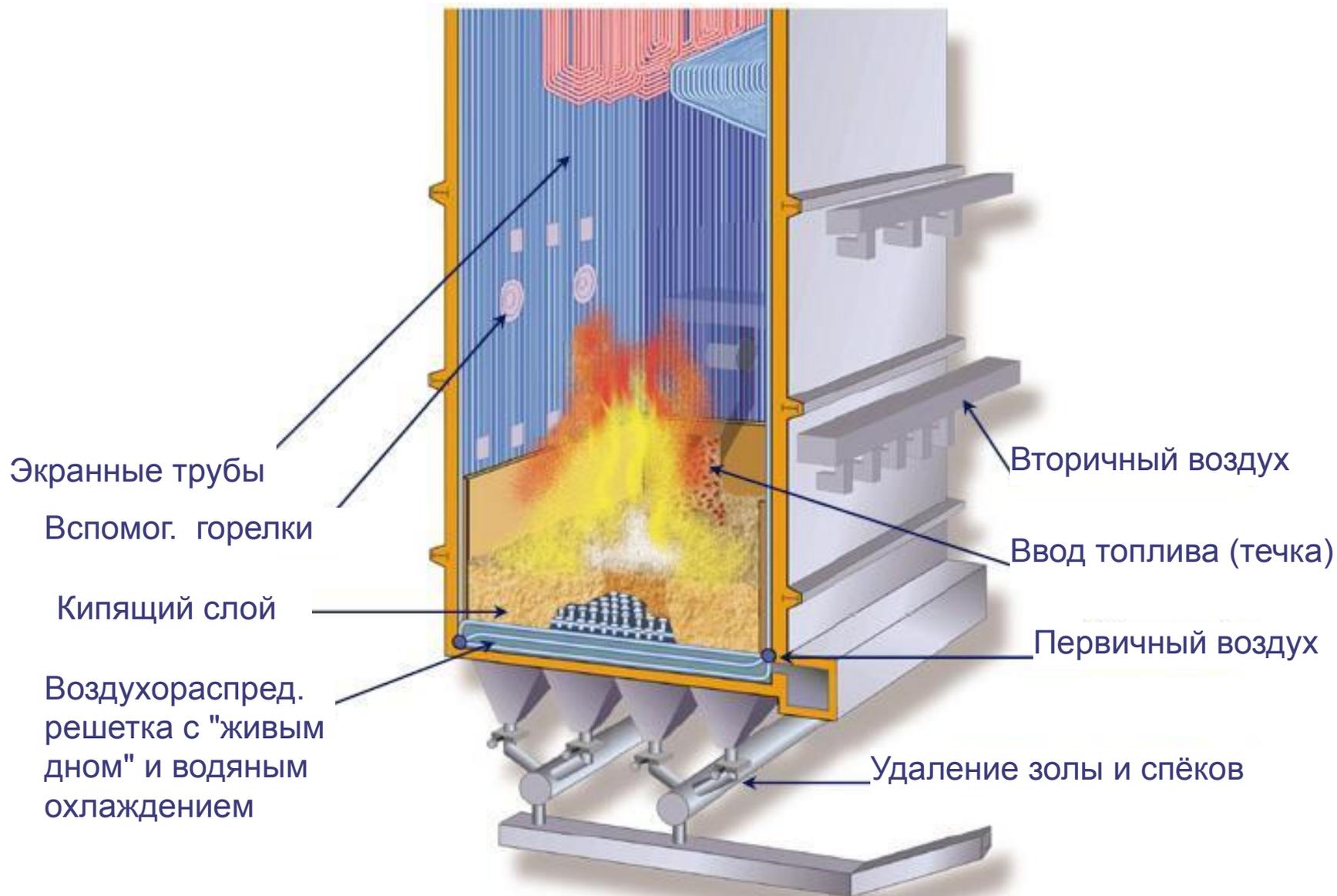
# Горение древесных брикетов в топке "Хотаб"



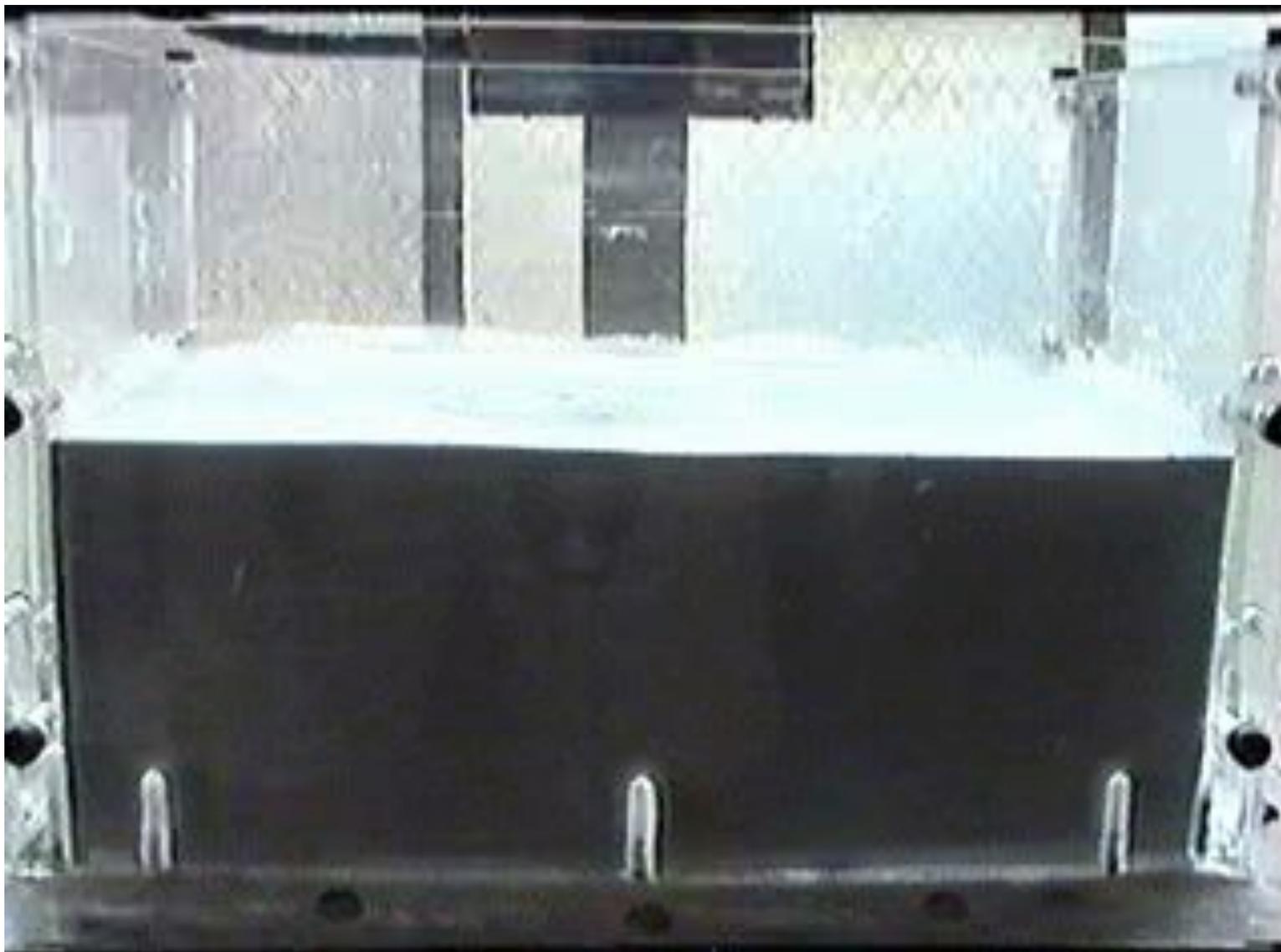
# Зависимость схемы горения топлива на наклонно-перекатывающейся решетке от положения источника зажигания



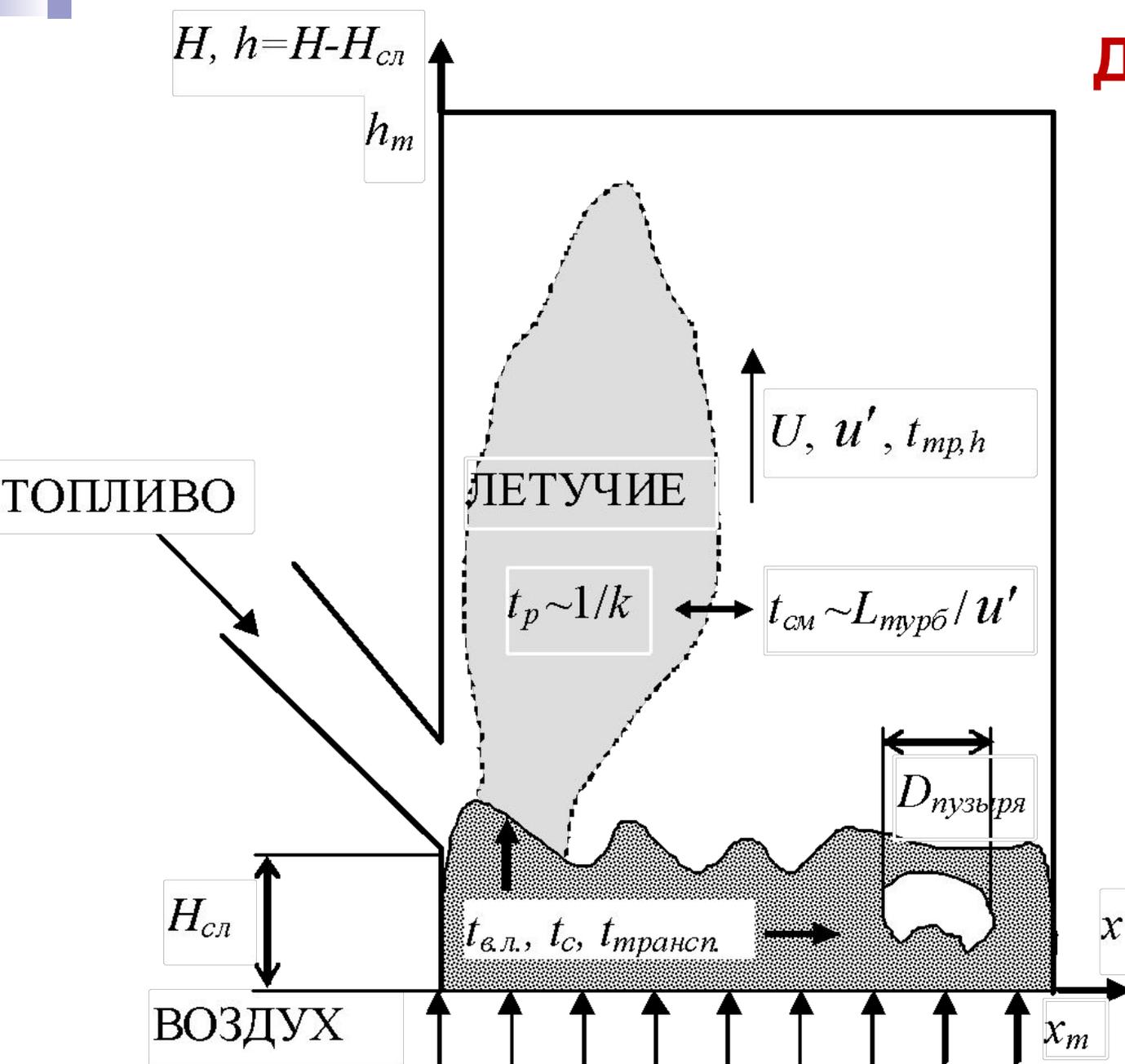
# Топка кипящего слоя (КС)



# Псевдооживенный (кипящий) слой (ПС, КС)



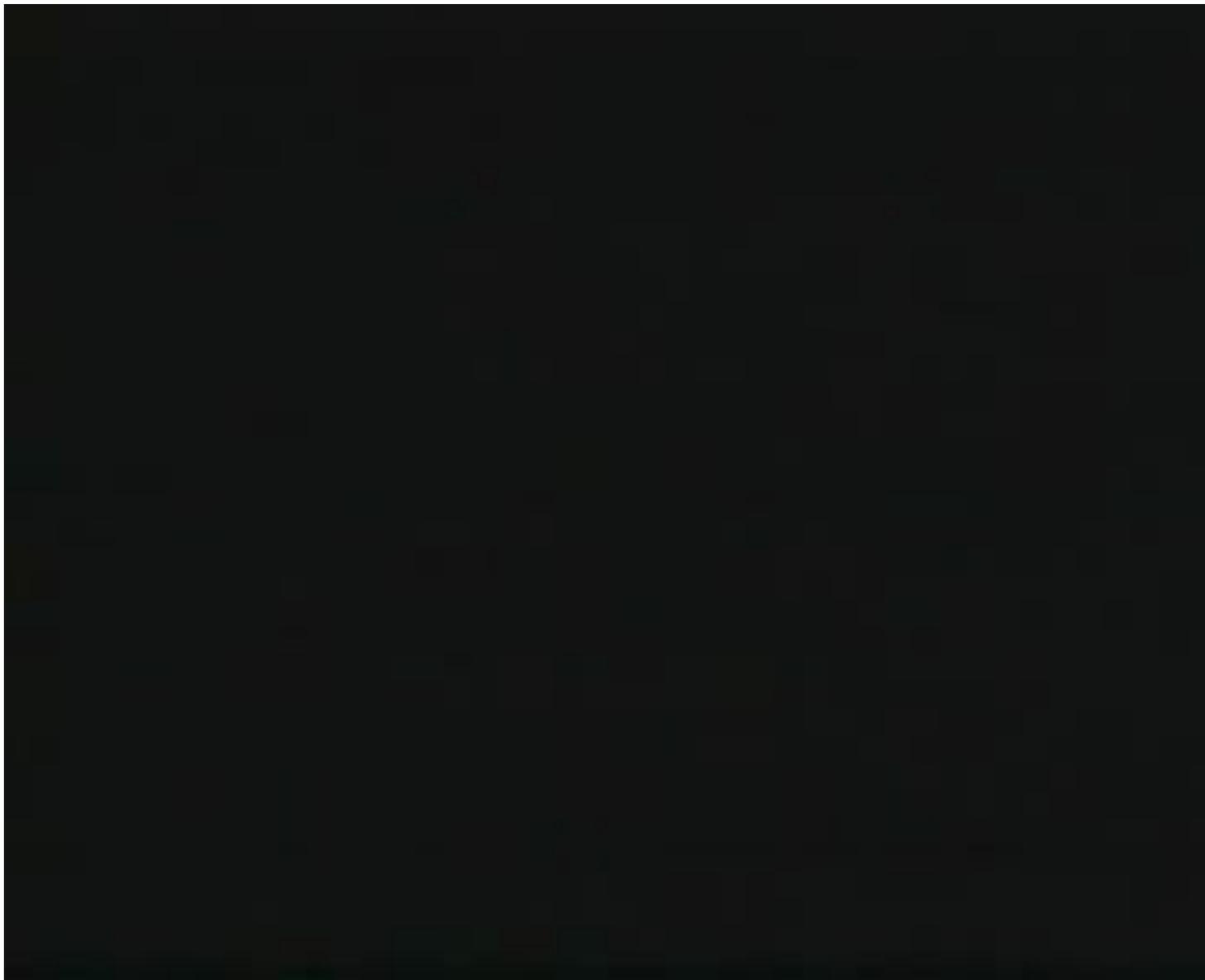
# Диффузионное горение летучих в топке КС



# Газовые пузыри в КС (слева) и ЦКС (справа) – минимальный масштаб неоднородности



# Газовые пузыри в кипящем слое – минимальный масштаб неоднородности распределения газа



# Горение древесного топлива в 2D кипящем слое



# Условия равномерного распределения летучих и кокса по сечению топки КС

**Критерий Дамкёлера**  $\equiv$

(Время транспорта частицы по длине топки,  $x_{\text{топки}}$ )

(Характерное время реакции)

для выхода летучих

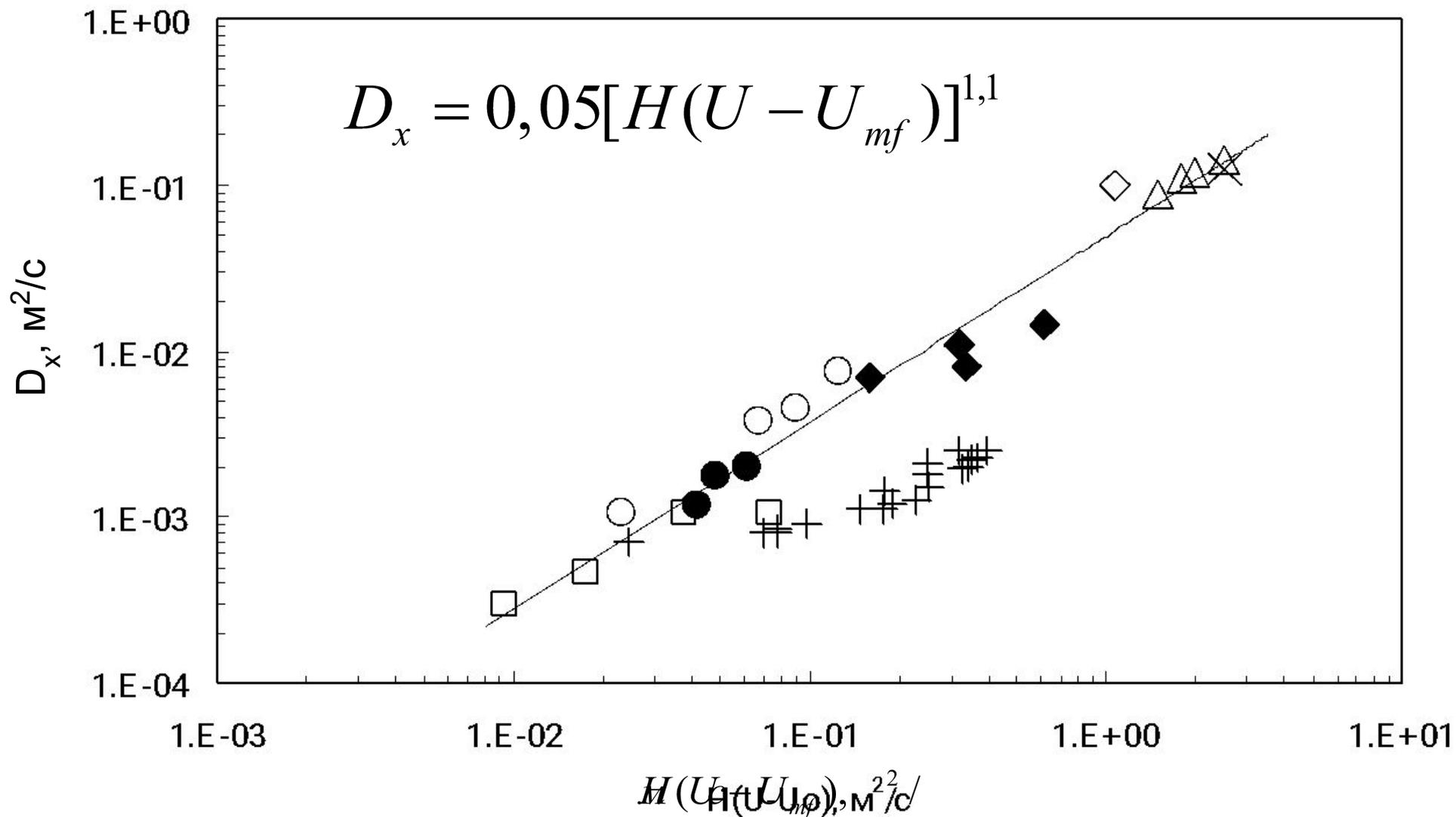
$$Da_{л,x} \equiv t_{тр,x} / t_{в.л.} \ll 1$$

для горения коксовых частиц

$$Da_{к,x} \equiv t_{тр,x} / t_c \ll 1$$

$$t_{трансп,x} = x_{топки}^2 / (2 D_x)$$

# Коэффициент горизонтального *перемешивания* частиц топлива в «инертном» КС / ЦКС



# Условие полного сгорания летучих в топке КС

**Критерий Дамкёлера**  $\equiv$  (Время транспорта газа по высоте надслоевого пространства,  $h_{топки}$ ) / (характерное время реакции)

$$Da_{\text{транспорта}} \equiv \frac{h}{t_{\text{гор}} / t_{\text{летучих}}} \gg 1$$

$$t_{\text{тр,г}} \approx h_m / U \quad t_{\text{г.л.}} \approx t_p + t_{\text{см}}$$

Характ. время химической реакции

$$t_p \approx \frac{1}{k}$$

Характ. время турбулентного смешения

$$t_{\text{см}} \approx \frac{L_{\text{турб}}}{u'}$$

Пульсационная скорость

$$u' \approx U$$

Масштаб смешения

$$D_{\text{пузыря}} < L_{\text{турб}} < h_{\text{топки}}$$

# Кинетика горения газов в смеси с воздухом

| Топливо         | $E, \times 10^{-3}$<br>Дж/моль | $k_0,$<br>1/с        |
|-----------------|--------------------------------|----------------------|
| СО (сухой)      | 96,8                           | $7,05 \cdot 10^6$    |
| СО (влажный)    | 96,3                           | $1,40 \cdot 10^{12}$ |
| Водород $H_2$   | 129,0                          | $2,14 \cdot 10^{14}$ |
| Метан $CH_4$    | 103,8                          | $5,60 \cdot 10^{12}$ |
| Пропан $C_3H_8$ | 61,5                           | $4,20 \cdot 10^{11}$ |

## Диаметр пузыря на выходе из КС высотой Н

$$D_{bs} \approx 1,3Fr^{2/3}H, \text{ м}$$

где критерий **Фруда**

$$Fr \equiv (U - U_{mf})^2/gH,$$

$U$  – скорость газа в расчёте на сечение топки, м/с,

$U_{mf}$  – скорость минимального псевдоожигения, м/с,

$H$  – высота КС, м.

## Скорость начала псевдооживления

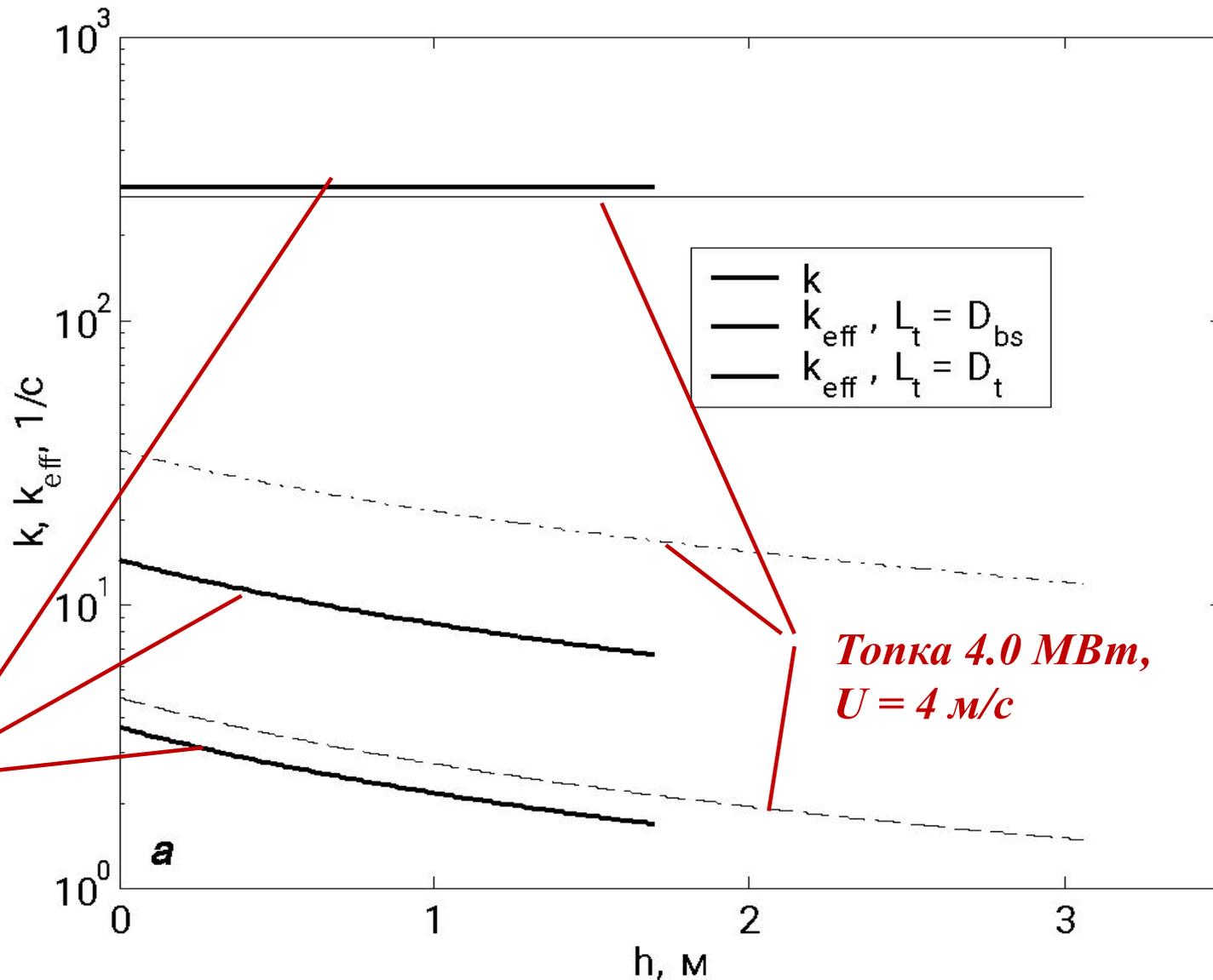
$$\text{Re}_{mf} \equiv \frac{U_{mf} d_p}{v_g} = \frac{\text{Ar}}{1400 + 5.22\sqrt{\text{Ar}}}$$

$$\text{Ar} \equiv \frac{g d_p^3}{v_g^2} \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g}$$

критерий Архимеда –  
соотношение сил *тяжести* (с  
учётом выталкивающей силы)  
и вязкого *трения*.

$\rho_p = 2600 \text{ кг/м}^3$  – кварцевый  
песок

# Эффективная скорость горения летучих в топке КС



**Топка  
0.4 МВт,  
 $U = 1.5$  м/с**

**Топка 4.0 МВт,  
 $U = 4$  м/с**

**a**

# Эффективность выгорания летучих – расчеты по модели

