

# Тепловые электрические станции (Введение в специальность)

## Лекция 3А Горение топлива

**«Всякое новое начинается как ересь –  
и кончается как ортодоксия»**

**К.Лоренц.**

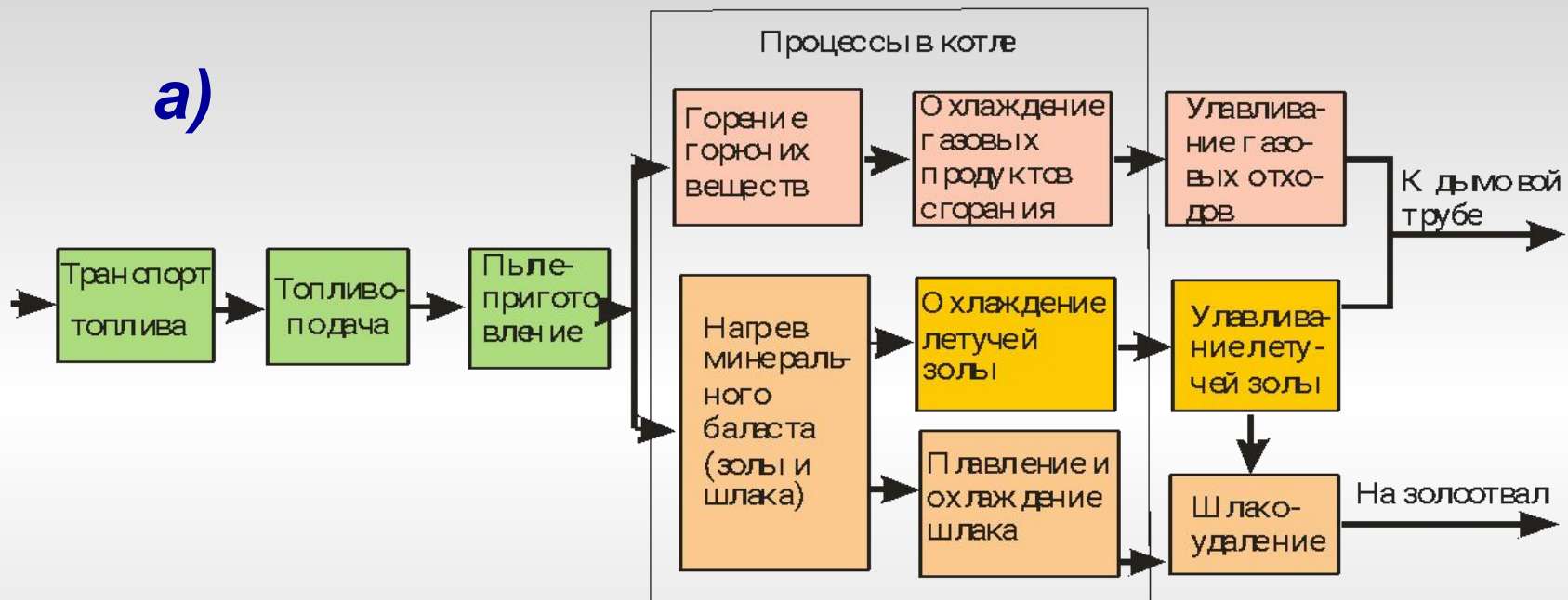
## Горение топлива

- Горение топлива это процесс химической реакции окисления определенных веществ, сопровождающийся выделением тепловой энергии.
- В природе не много химических элементов, которые при окислении выделяют энергию: **углерод, водород, сера, азот и их соединения.**
- Всякое топливо проходит цепочку технологических операций от момента добычи до выхода из котла ТЭС в виде продуктов сгорания.
- Физико-химические преобразования его сопровождаются получением определенного количества энергии и выходом прогнозируемого количества различных газов, твердого шлака и золы

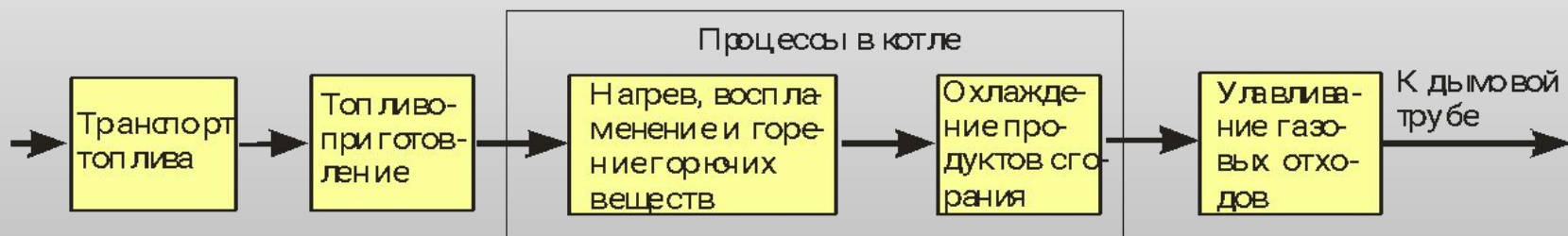
# Физико-химические преобразования твердого (а), жидкого и газообразного (б) топлива

## ТОПЛИВА

а)



б)



# Горение твердого топлива

Химический элемент топлива	Плотность веществ, кг/м <sup>3</sup>	Реакция окисления	Удельная (объемная) теплота сгорания	
			Для твердых тел, МДж/кг	Для жидкостей и газов, МДж/м <sup>3</sup>
Углерод		$O + \zeta \Theta_2$	33,91 4,4	-
Окись углерода	1,25	$CO + 0,5O_2 = CO_2$	10,11	12,64 12,65
Водород	0,09	$H_2 + 0,5O_2 = H_2O$	103,0	10,8
Сера		$S + \zeta \Theta_2$	10,89	-
Сероводород	1,52	$H_2S + 1,5O_2 = H_2O + SO_2$	-	23,38 23,4
Азот	1,25			
Метан	0,716	$CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$	-	35,82 35,85
Этан	1,342	$C_2H_6 + 3,5O_2 = 2CO_2 + 3H_2O$	-	63,75 63,8
Пропан	1,967	$C_3H_8 + 5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$	-	91,1 91,3
Бутан	2,593	$C_4H_{10} + 6,5O_2 = 4CO_2 + 5H_2O$	-	118,45 118,7
Пентан	3,218	$C_5H_{12} + 8O_2 = 5CO_2 + 6H_2O$	-	146,08 146,2
Этилен	1,25	$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	-	59,07 59,1
Пропилен	1,877	$C_3H_6 + 4,5O_2 = 3CO_2 + 3H_2O$	-	85,86 86,1
Бензол	3,485		-	140,37 141,5
Гексан	3,848	$C_6H_{14} + 9,5O_2 = 6CO_2 + 7H_2O$	-	173,17
Гептан	4,474	$C_7H_{16} + 11O_2 = 7CO_2 + 8H_2O$	-	200,55

## Продукты горения

- Основными продуктами реакций окисления являются углекислый газ  $CO_2$  и водяной пар  $H_2O$ .
- При соединении  $H_2O$  с окислами серы, азота и углерода образуются кислоты.
- Идут реакции с образованием окислов азота, находящегося в топливе и в воздухе.
- Сера в топливе может быть не только в чистом виде, но и в составе колчедана  $FeS_2$  и сульфата (например,  $CaSO_4$ ), который может образовываться из реакции с карбонатами при температурах 400-600 °С.
- При  $t > 1000$  °С сульфаты, в свою очередь, разлагаются до окислов серы и кальция.
- Колчедан при  $t > 400$  °С окисляется с образованием окислов серы и железа.

# Горение твердого топлива

- **Сложнее всего горит твердое топливо.**
- **Твердое топливо несжимаемо, в отличие от газообразного и жидкого.**
- **В процессе всего горения частицы твердого топлива не только не расширяются, но наоборот уменьшают свой объем.**
- **Поэтому, чтобы увеличить поверхность соприкосновения твердых горючих частиц с окислителем, твердое топливо приходится тщательно измельчать в мельницах.**
- **Температура воспламенения большинства углеводородов равна  $100\div 250$  °С, в то время как для коксового остатка, являющегося основой горения большинства углей, температура воспламенения не менее  $750$  °С.**
- **Отсюда возникает необходимость более детально проанализировать возможности воспламенения и горения твердых топлив и, особенно, низкорреакционных топлив.**

# Поведение пылинок твердого топлива и механизм выгорания их

- Механизм выгорания частиц в факеле определяется взаимодействием твердых частичек топлива с газовоздушным потоком, обтекающим их.
- В топке котла должен соблюдаться подвод теоретически необходимого количества воздуха  $V^0$  для выгорания одного килограмма топлива.
- Для всего топлива, подаваемого в топку, это условие соблюдается с некоторым избытком воздуха  $\alpha$ , определяемым конкретной конструкцией котла, маркой топлива и типом шлакоудаления.
- Частица топлива, измельченная в системе пылеприготовления до размеров  $20 \div 100$  мкм, попадая в топку с воздухом, должна нагреваться до температуры воспламенения (более чем  $800$  °С) и выгореть за период времени, равный длительности пребывания пылинки в топке.
- Для улучшения условий воспламенения и сгорания частиц угля, помимо тонкого помола топлива, необходимо иметь высокую температуру газов в факеле (до  $1500 \div 1700$  °С) и воздуха на входе в топку (для АШ не ниже  $400$  °С).

# Кинематика горения частицы топлива

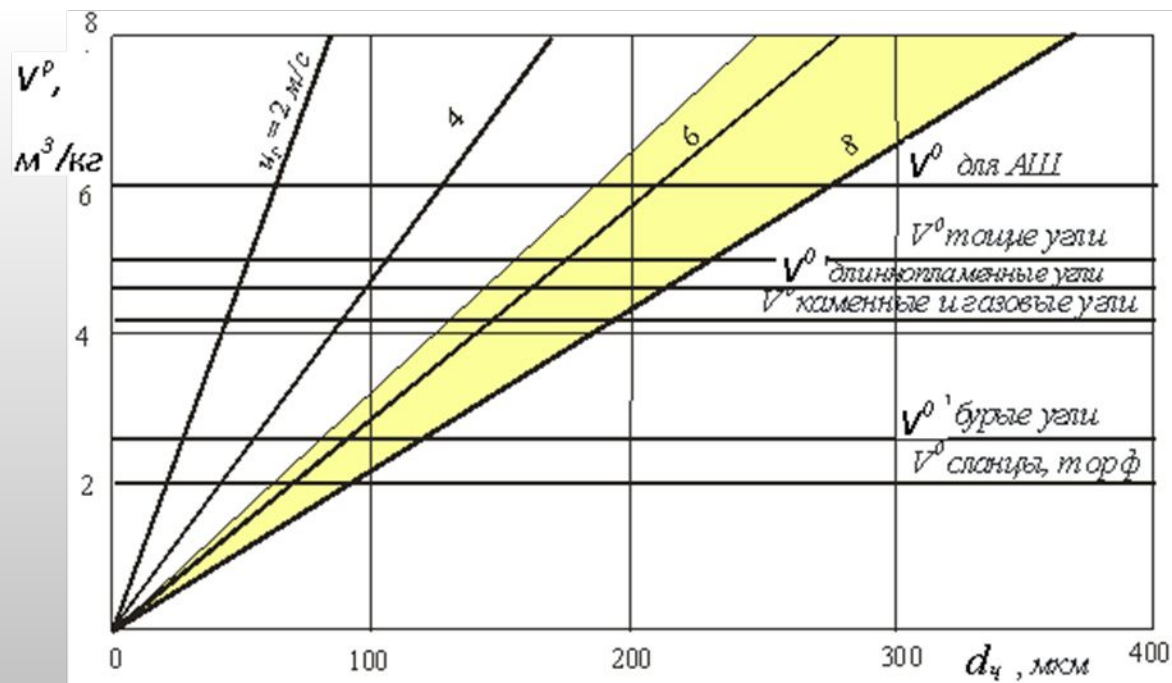
- В топке котла увеличивается скорости движения среды (до  $7 \div 10$  м/с) и уменьшается время пребывания топливных частиц, движущихся в потоке газов.
- В топках котлов газоздушная смесь изменяет свой удельный объем от  $v = 1,4$  м<sup>3</sup>/кг на входе ( $t = 200$  °С) до  $v = 5,35$  м<sup>3</sup>/кг в центре ( $t = 1500$  °С) и до  $v = 3,55$  м<sup>3</sup>/кг на выходе из топки ( $t = 900$  °С).
- В равномерном потоке пылинки угля отстают от движущейся газовой среды на величину, равную скорости витания частиц:
 
$$u_{\hat{A}} = u_{\bar{A}} - u_{\hat{0}} = \sqrt{\frac{4g(\rho_0 - \rho_{\hat{A}})d_{\hat{A}}}{3\rho_{\hat{A}}C}}$$
- Частицы угля размером 20 мкм (при  $\rho_T = 1300$  кг/м<sup>3</sup> и  $\rho_G = 0,7$  кг/м<sup>3</sup>) имеют скорость витания  $u_B \cong 0,014 \div 0,02$  м/с.
- За время пребывания в топке  $\tau_T$ , с., твердую частицу топлива обтекает количество воздуха  $V_{\hat{A}} = F_B \frac{\Delta u \tau_T}{B} + V_{\hat{0}}$ , определяемое по уравнению
 
$$K_{\hat{A}} = F_B \frac{\Delta u \tau_T}{B} + V_{\hat{0}} = \frac{\pi d_{\hat{A}}^2}{4} \frac{\Delta u \tau_T}{\rho_T} + V_{\hat{0}}$$
- Реальное количество воздуха, участвующего в реакции окисления частицы угля, в пересчете на единицу массы, определяется по уравнению
 
$$V_{\hat{A}} = \frac{V_{\hat{A}}}{m} = \frac{F_B \Delta u \tau_T}{V_{\hat{A}} \rho_T} + \frac{3 \Delta u \tau_T}{2 d_{\hat{A}} \rho_T}$$



# Кинематика горения частицы топлива

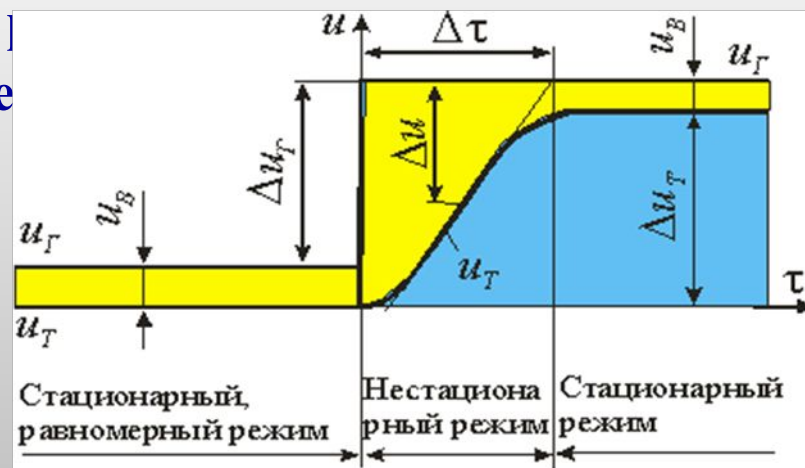
- При горении частиц **низкорреакционного** топлива в равномерном потоке воздух оказывается не востребуемым, и с увеличением скорости размеры и количество несгорающих частиц увеличиваются.
- Другие марки топлива имеют преимущества при сжигании, поскольку для них количество теоретически необходимого воздуха  $V^0$  рекомендуется принимать меньше, чем для АШ.

- Чтобы обеспечить благоприятные условия для сжигания пылинок угля в факеле, необходимо создавать неравномерность движения топочных газов и твердых частиц угля в них.



# Кинематика горения частицы топлива

- **Нестационарность** движения может быть организована в результате абсолютного (пульсирующего) или векторного (вихревого) изменений скорости газов, или столкновений пылинок между собой в потоке.
- Частицы твердого топлива, обладающие большей инертностью, чем газовая среда, запаздывают при изменении движения.
- Разность между скоростями топочных газов и частицы в этом случае увеличивается по сравнению со скоростью витания  $u_B$ .
- Таким образом, любое нарушение равномерности движения потока газов с пылинками угля увеличивает [ - воздух» ( $V^P$ ), что способствует лучше
- При вихревом движении для частиц углерода в частице угля реальное соотношение «топливо-воздух»  $V^P$  увеличивается в 10-100 раз по сравнению с равномерным движением, что обеспечивает выгорание частицы угля.

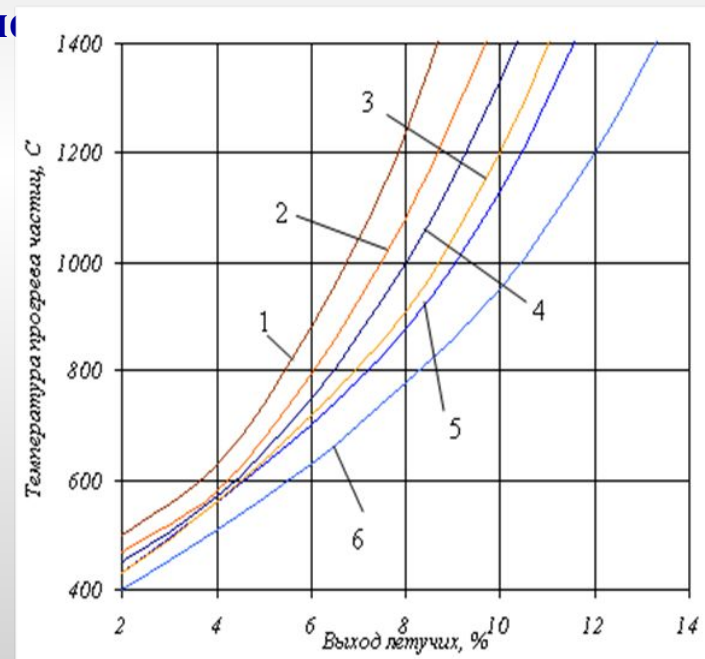


# Выгорания частицы топлива в объеме топочной камеры

- Весь процесс горения пыли в камерной топке делится на отдельные этапы: прогрев частиц топлива до воспламенения летучих; горение собственно летучих; воспламенение и горение коксового остатка.
- Частица твердого топлива с  $t = 150 \div 200$  °C, выходя из горелки в топочное пространство, увлекается потоком, сначала, чистого воздуха, а затем смесью топочных газов.
- При движении частица попадает в равномерный или турбулентный потоки разной интенсивности; сталкивается с другими частицами.
- Вероятность и количественная оценка столкновений определяется по концентрации частиц в потоке.
- При выходе частиц твердого топлива в топочное пространство происходит подвод конвективного и радиационного тепла от факела.
- При этом, испаряется влага (при температуре более 100°С) и выходят летучие из частицы при  $t > 500$ °С, что сопровождается процессами окисления с выделением тепла, которое расходуется на дальнейший нагрев частицы и подаваемого с пылью воздуха.

# Выгорания частицы топлива в объеме топочной камеры

- Основным источником тепла у твердых топлив является углерод, но выход летучих играет существенную роль при воспламенении факела.
- Горючие летучие осуществляют подвод тепла  $q$ , ускоряющий прогрев и воспламенение частицы.
- Ранний нагрев частицы происходит только за счет воздуха от собственных летучих ( $V^2 = 4\%$ ) произойдет до  $550 \div 700\text{ }^\circ\text{C}$ .
- Этого не хватает, чтобы воспламенить основной источник горения - коксовый состав частицы.
- Температура воспламенения кокса происходит при температурах  $850 \div 900\text{ }^\circ\text{C}$ .
- Недостающее тепло частица получает излучением от других источников тепла



Температура нагрева частички топлива при горении летучих ( $V^r$ , %) при температуре воздуха  $t = 600\text{ }^\circ\text{C}$ .  $q_{ox} = 0,7$ : 1.-  $A^r = 20\%$ ; 2.-  $A^r = 30\%$ ; 3.-  $A^r = 40\%$ ;

$q_{ox} = 0,6$ : 4.-  $A^r = 20\%$ ; 5.-  $A^r = 30\%$ ; 6.-  $A^r = 40\%$ ;

# Выгорание коксового остатка

Воспламенение коксового остатка частицы при факельном сжигании **низкорреакционного** топлива осложняется тем, что тепла при горении летучих недостаточно, чтобы: 1) быстро разогреть частицу до условий воспламенения и, 2) создать необходимую разность температур для положительной диффузии воздуха к поверхности частицы.

Кислород имеет большую плотность, чем воздух атмосферы, но меньшую, чем углекислый газ.

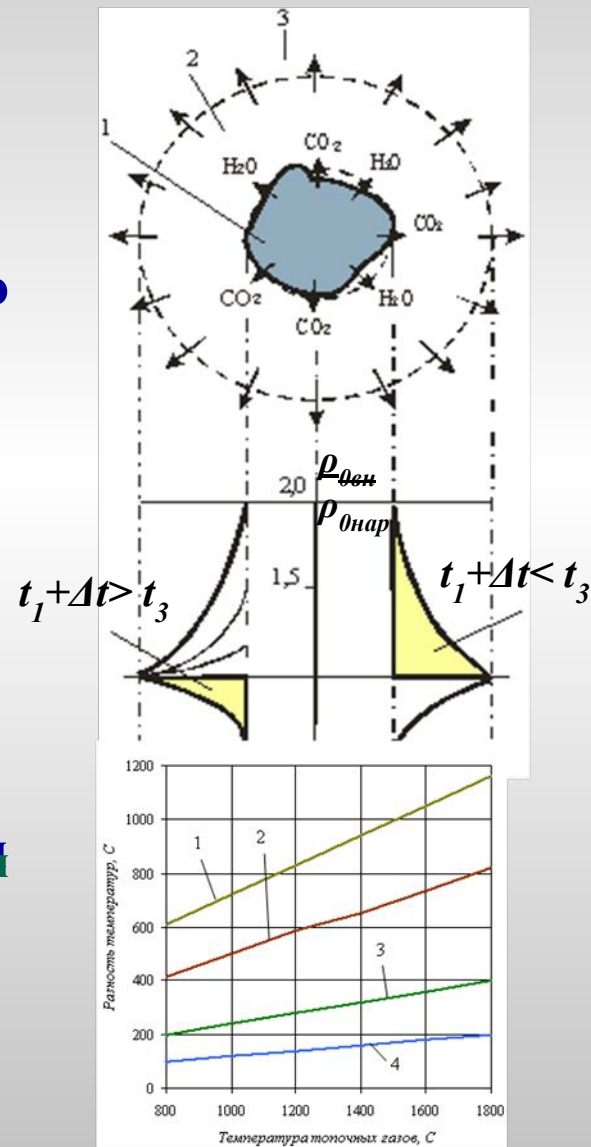
Горение частицы **низкорреакционного** топлива осложняется: 1) по причине малого соотношения плотностей вокруг нее и, 2) потому что концентрация кислорода в факеле, при среднем движении уменьшается. плотность сред в зависимости от температуры топочных газов.

$$1. - \rho_{0 \text{ вн}} / \rho_{0 \text{ нар}} = 1,57;$$

$$2. - \rho_{0 \text{ вн}} / \rho_{0 \text{ нар}} = 1,4;$$

$$3. - \rho_{0 \text{ вн}} / \rho_{0 \text{ нар}} = 1,2;$$

$$4. - \rho_{0 \text{ вн}} / \rho_{0 \text{ нар}} = 1,1;$$







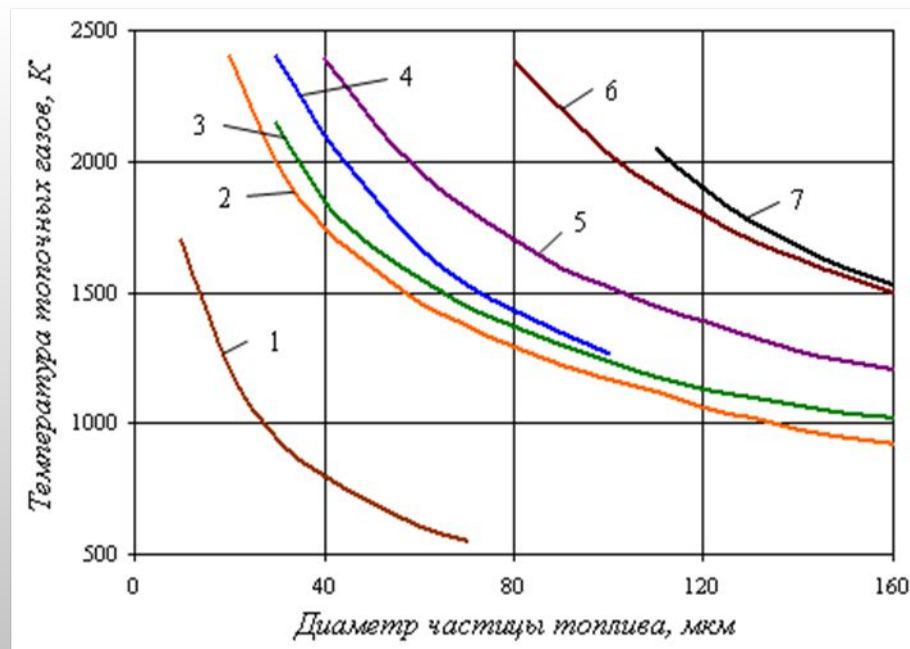
# Реальное горение

Для эффективного горения твердых, **низкорреакционных** топлив, помимо тонкого измельчения и предварительного подогрева пыли до выхода ее в топку котла, не для всех марок топлива следует рекомендовать высокие температуры горения, которые присущи факельному сжиганию углей в камерной топке.

Однако температура горения при этом не должна быть ниже температур воспламенения кокса.

Зависимость температуры горения от диаметра частиц при условии, когда время воспламенения и горения летучих равно времени воспламенения коксового состава для:

1. – антрацитового штыба; 2. – тощих углей; 3. – газовых углей; 4. – эстонских сланцев; 5. – слабоспекающихся; 6. – жирных; 7. – бурых углей





# Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)

**Благодарю за внимание**

Ефимов Николай Николаевич – проф., д.т.н., зав каф. ТЭС