

Тепловые электрические станции (Введение в специальность)

Лекция 3А Горение топлива

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

К.Лоренц.

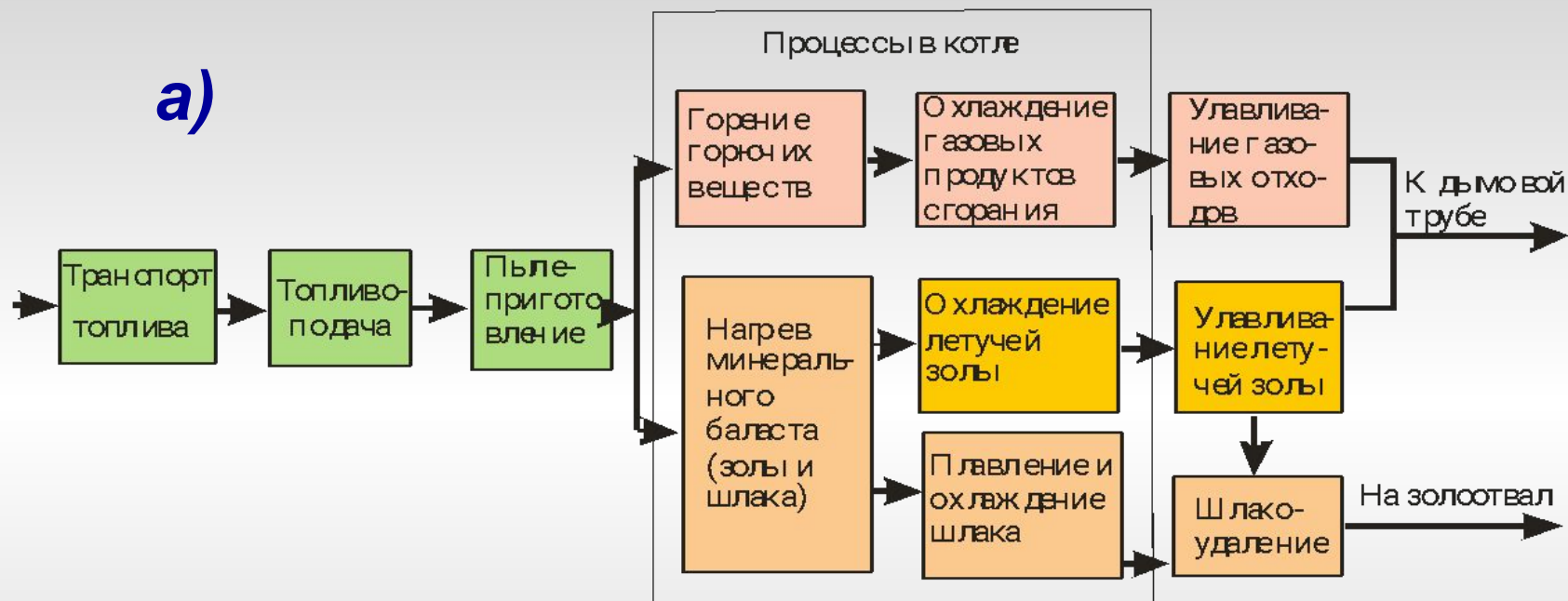
Ефимов Николай Николаевич – проф., д.т.н., зав каф. ТЭСиТ

Горение топлива

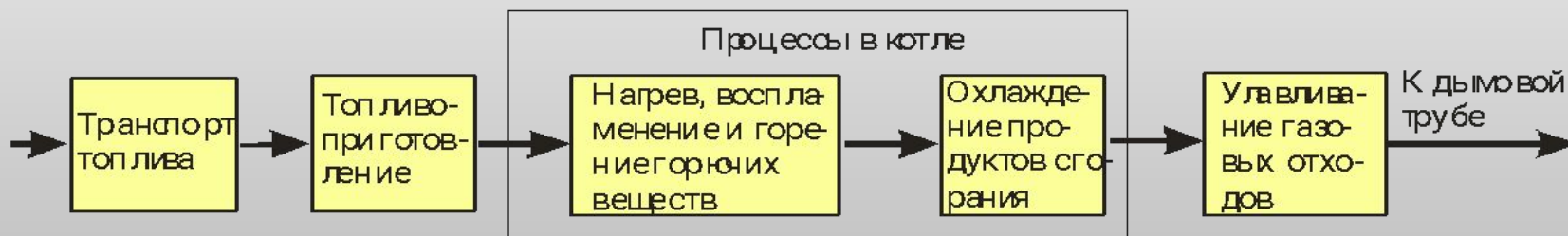
- Горение топлива это процесс химической реакции окисления определенных веществ, сопровождающийся выделением тепловой энергии.
- В природе не много химических элементов, которые при окислении выделяют энергию: **углерод, водород, сера, азот и их соединения.**
- Всякое топливо проходит цепочку технологических 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

а)



б)



Горение твердого топлива

Химический элемент топлива	Плотность веществ, кг/м ³	Реакция окисления	Удельная (объемная) теплота сгорания	
			Для твердых тел, МДж/кг	Для жидкостей и газов, МДж/м ³
Углерод		$O + \frac{1}{2}O_2$	33,91 4,4	-
Оксид 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		$S + \frac{1}{2}O_2$	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, низкореакционных топлив.

Поведение пылинок твердого топлива и механизм выгорания их

- Механизм выгорания частиц в факеле определяется взаимодействием твердых частичек топлива с газоздушным 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 α , 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°C) 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 $1500 \div 1700^\circ\text{C}$) и воздуха на входе в топку (для АШ не ниже 400°C).

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 $v = 1,4$ м³/кг на входе ($t = 200$ °C) до $v = 5,35$ м³/кг в центре ($t = 1500$ °C) и до $v = 3,55$ м³/кг на выходе из топки ($t = 900$ °C).
- В равномерном потоке пылинки угля отстают от движущейся газовой среды на величину, равную скорости витания частиц:

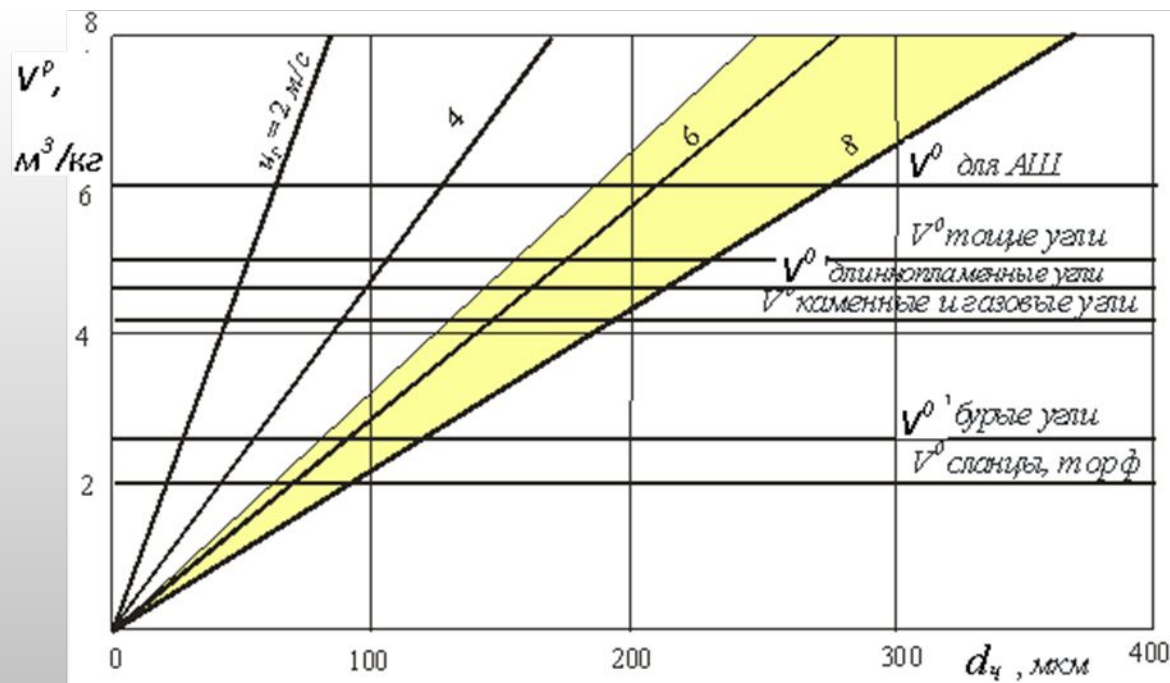
$$u_A = u_A - u_0 = \sqrt{\frac{4g(\rho_0 - \rho_A)d}{3\rho_A C}}$$
- Частицы угля размером 20 мкм (при $\rho_T = 1300$ кг/м³ и $\rho_G = 0,7$ кг/м³) имеют скорость витания $u_B \approx 0,014 \div 0,02$ м/с.
- За время пребывания в топке τ_T , с., твердую частицу топлива обтекает количество воздуха V_B , м³, определяемое по уравнению

$$V_B = F_B \Delta u \tau_T + \frac{\pi d^2}{4} V_0 \tau_T + \frac{\pi d^3}{6} V_0 \tau_T$$
- Реальное количество воздуха, участвующего в реакции окисления частицы угля, в пересчете на единицу массы, определяется по уравнению

$$V_B = \frac{F_B \Delta u \tau_T}{m} + \frac{3 \Delta u \tau_T}{2 d \rho_T}$$

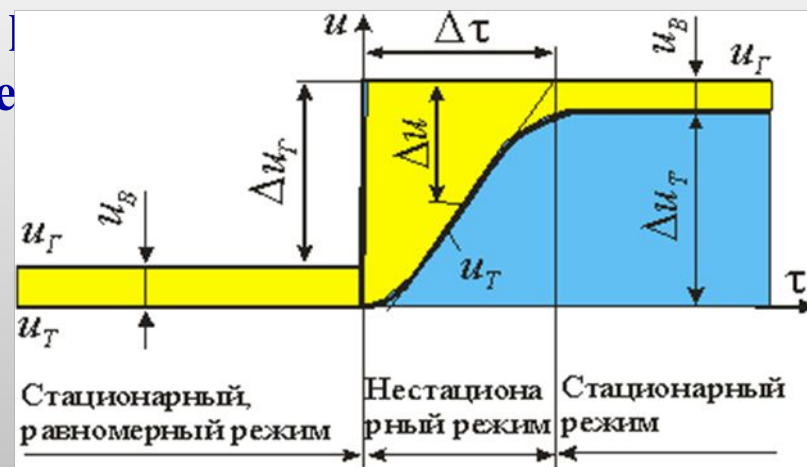
Кинематика горения частицы топлива

- При горении частиц **низкорекреационного** 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 [разность скоростей «топливо-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.

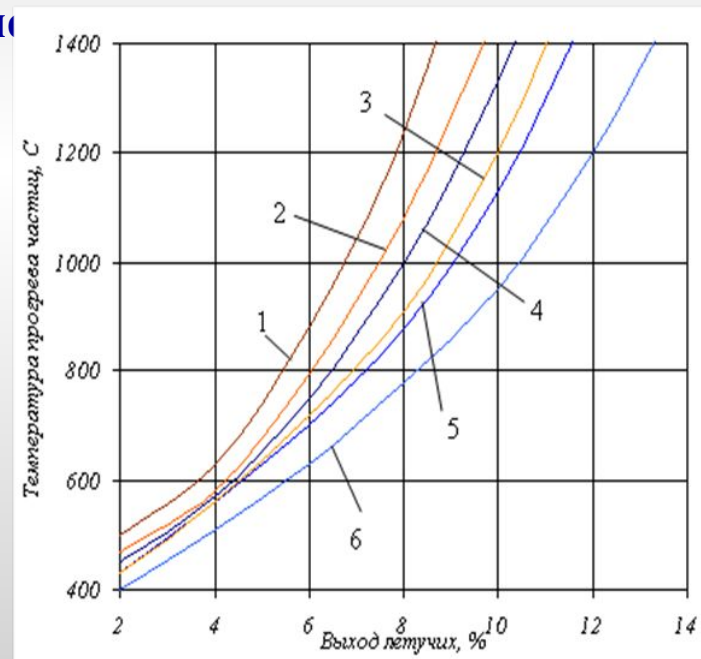


Выгорания частицы топлива в объеме топочной камеры

- 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°C) и выходят летучие из частицы при $t > 500$ °C, 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 летучих.
- Для низкорекреационного топлива нагрев его и воздуха от собственных летучих ($V^2 = 4\%$) произойдет до $550 \div 700^\circ\text{C}$.
- Этого не хватает, чтобы воспламенить основной источник горения - коксовый состав частицы.
- Температура воспламенения кокса происходит при температурах $850 \div 900^\circ\text{C}$.
- Недостающее тепло частица получает излучением от других источников тепла



(факела), или за счет подачи дополнительного тепла. Температура нагрева частицы топлива при горении летучих (V^r , %) при температуре воздуха $t = 950^\circ\text{C}$. $q_{ox} = 0,7$: 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 **низкорекреационного** 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.

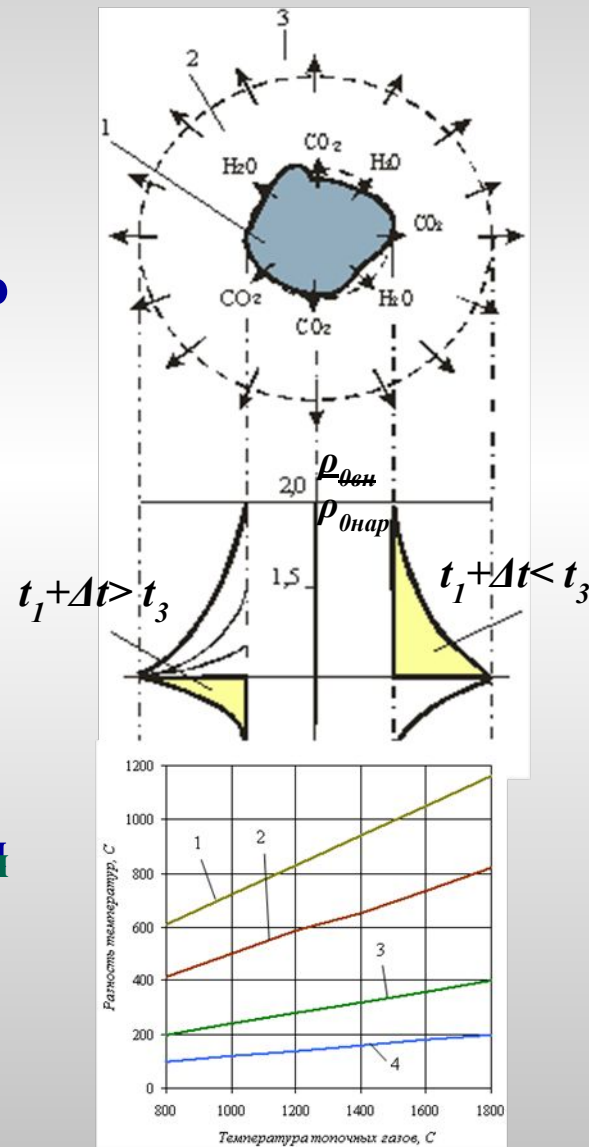
Горение частицы **низкорекреационного** топлива осложняется: 1) по причине малого соотношения плотностей вокруг нее и, 2) потому что концентрация кислорода в факеле, по мере движения уменьшается. плотность сред в зависимости от температуры топочных газов.

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

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

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

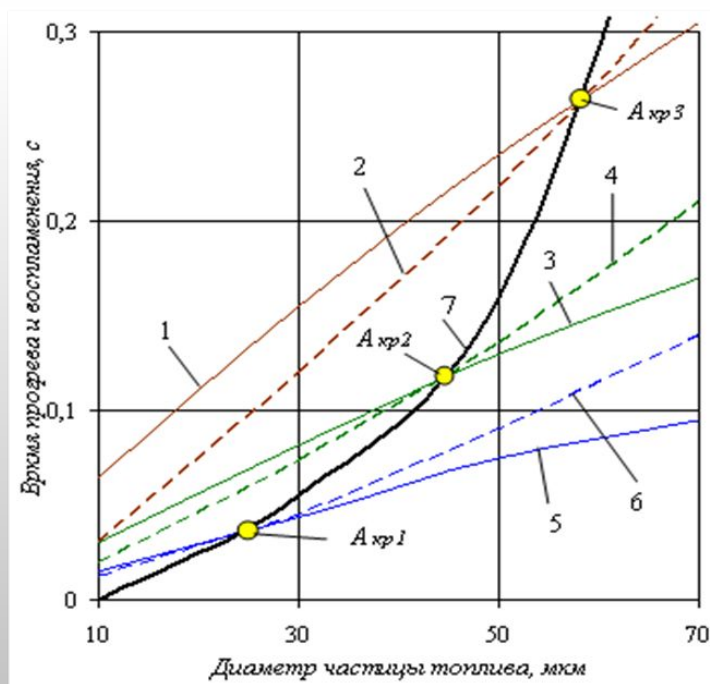
$$4. - \rho_{0 \text{ вн}} / \rho_{0 \text{ нар}} = 1,1;$$



Реальный процесс горения частицы

При движении частиц от устья горелки к ядру факела они получают большое количество тепла за счет радиационного излучения и конвективного теплообмена от окружающего газового потока. При этом движении частицы происходит изменение фоновой температуры. Таким образом, все процессы, возникающие при движении и преобразованиях в горячей частице и вокруг нее, имеют нестационарный характер, что способствует горению.

Зависимости времени прогрева и воспламенения летучих (1, 3, 5), и коксового состава (2, 4, 6) соответственно при температуре топочных газов 627°C , 777°C и 927°C , от размеров частиц топлива марки кузнецкие тощие угли; 7 – условие, когда временные периоды горения летучих и воспламенения кокса совпадают



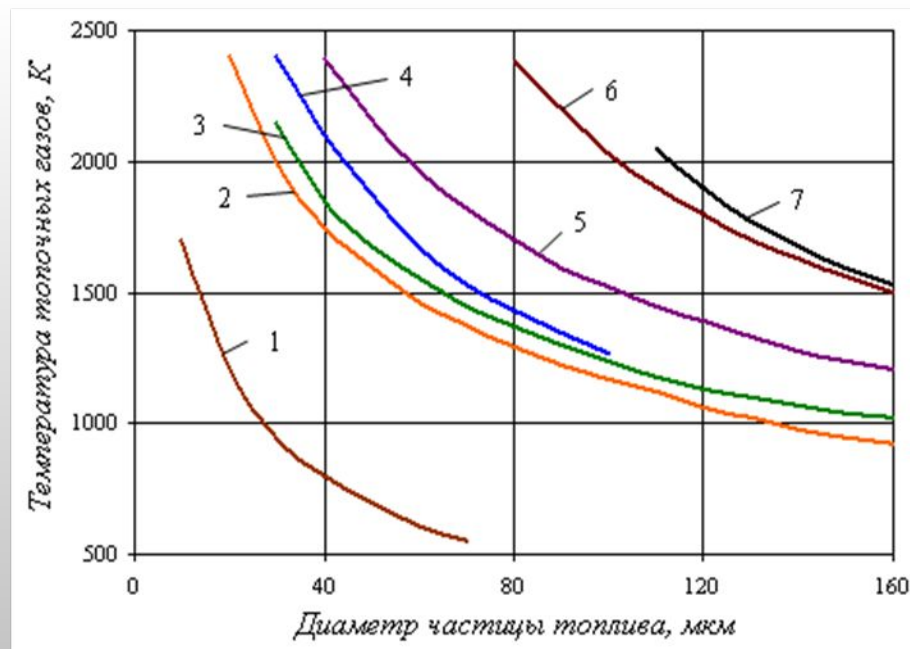
Реальное горение

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