

# Горение угольной частицы. Механизм выгорания частиц.

**Преподаватель:** Кафедра «Энергетики» , PhD доктор,  
ассоциированный профессор, Онгар Булбул

[b.ongar@satbayev.university](mailto:b.ongar@satbayev.university)

# Введение

- 1 Способы сжигания топлива;
- 2 Состав топлива;
- 3 Физико-химические преобразования твердого, жидкого и газообразного топлива ;
- 4 Поведение пылинок твердого топлива и механизм выгорания;
- 5 Кинематика горения частицы топлива;
- 6 Выгорания частицы топлива в объеме топочной камеры;
- 7 Выгорание коксового остатка.

# Способы сжигания топлива



# Способы сжигания топлива

В промышленности используется множество видов топлива, в основном органического происхождения. Топливо различается по состоянию (твердое, жидкое, газообразное) и по химическому составу. Различные виды топлива имеют разную теплотворную способность — количество тепла, выделяющееся при полном сгорании 1 кг твердого и жидкого или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива. Количество тепла измеряется килокалориями. Килокалория — это количество тепла, необходимое для нагревания 1 литра воды на 1° С.

# Способы сжигания топлива

- Всякое топливо содержит некоторое количество влаги, кроме того, водород, имеющийся в топливе, при сгорании образует воду. На испарение воды затрачивается часть тепла, что приводит к уменьшению теплотворной способности. Различают два вида теплотворной способности: высшую, с учетом тепла, расходуемого на испарение влаги, и низшую, за вычетом тепла, расходуемого на испарение влаги. При сжигании топлива в печах влага переходит в пар и вместе с дымом уходит в атмосферу. Поэтому при всех расчетах учитывают низшую теплотворную способность.

# Способы сжигания топлива

Условное топливо. Если взять определенное количество какого-либо топлива и принять за единицу количество тепла, выделяемое при полном его сжигании, то легко рассчитать, какое количество других видов топлива необходимо сжечь для получения такого же количества тепла.

# Способы сжигания топлива

При расчетах за единицу берут топливо с теплотворной способностью 7000 ккал/кг. Это так называемое условное топливо. Например, 1 кг мазута, выделяющий при сгорании примерно 10 500 ккал, обладает большей теплотворной способностью, чем 1 кг условного топлива, в 1,5 раза ( $10\ 500:7000$ ). Теплотворная способность газа оценивается исходя из количества калорий, получаемых при сжигании одного кубического метра газа при атмосферном давлении (1 нм<sup>3</sup>). Для других видов топлива будут другие эквиваленты.



# Состав топлива

- Состав топлива. Различные виды топлива сильно отличаются друг от друга, хотя все они состоят почти из одних и тех же веществ, только в разных количествах и различных соединениях. Вещества, входящие в состав топлива, можно разделить на две группы. Одни вещества активно участвуют в горении, выделяют тепло и составляют горючую часть топлива. К этой группе относятся: углерод — С, водород — Н, сера — S. Другие вещества не участвуют в горении, а некоторые из них являются даже вредными, так как снижают теплотворную способность топлива и мешают правильному горению. Эти элементы составляют негорючую часть топлива — балласт. К этой группе относятся: азот, кислород, вода, зола.

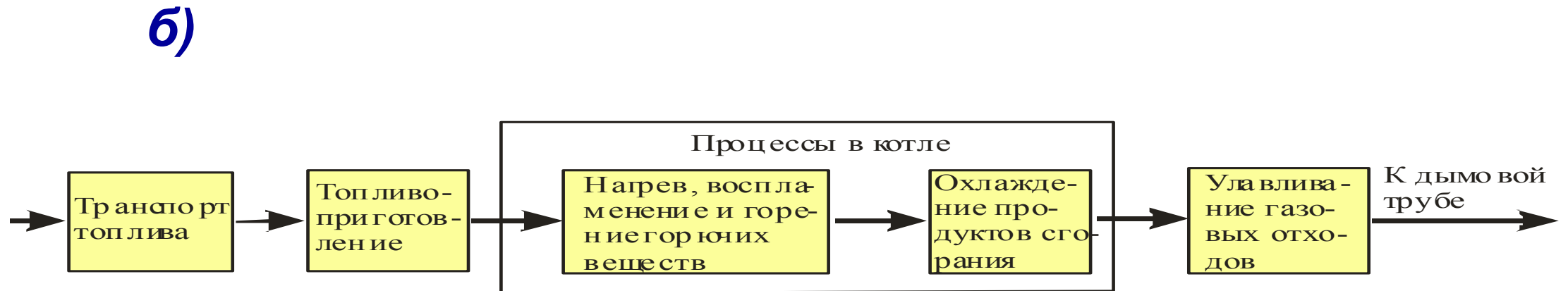
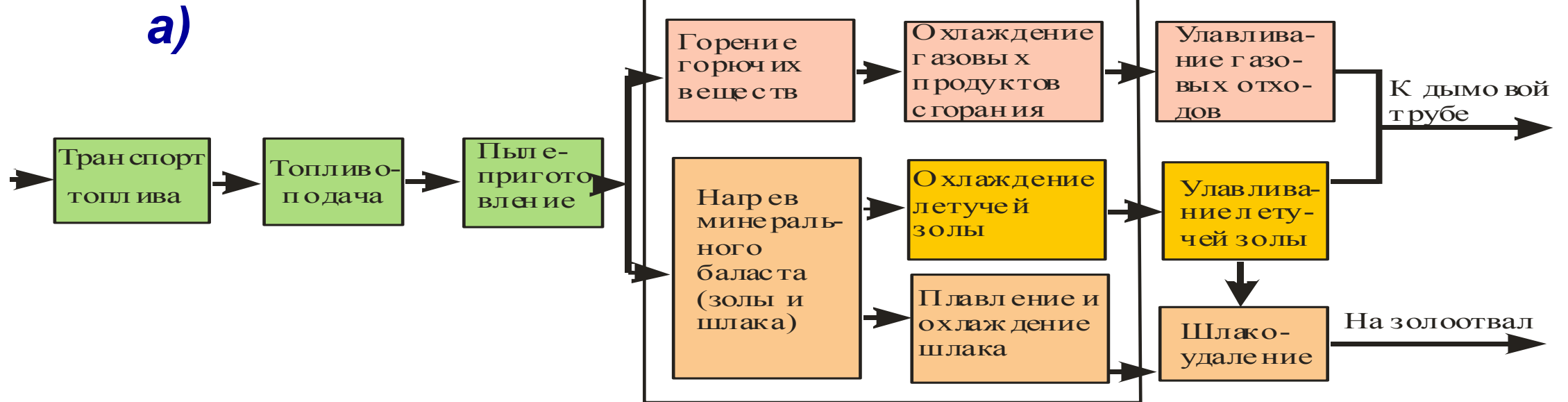




# Горение топлива

- 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



# 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		$C + O_2 = CO_2$	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		$S + O_2 = SO_2$	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	$\tilde{N}_5\hat{I}_{12} + 8\hat{I}_2 = 5\tilde{N}\hat{I}_2 + 6\hat{I}_2\hat{I}$	-	146,08 146,2
Этилен	1,25	$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$	-	59,07 59,1
Пропилен	1,877	$\tilde{N}_3\hat{I}_6 + 4,5\hat{I}_2 = 3\tilde{N}\hat{I}_2 + 3\hat{I}_2\hat{I}$	-	85,86 86,1
Бензол	3,485	$\tilde{N}_6\hat{I}_6 + 7,5\hat{I}_2 = 6\tilde{N}\hat{I}_2 + 3\hat{I}_2\hat{I}$	-	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  $^{\circ}C$ .
- При  $t > 1000$   $^{\circ}C$  сульфаты, в свою очередь, разлагаются до окислов серы и кальция.
- Колчедан при  $t > 400$   $^{\circ}C$  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÷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÷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:

$$u_B = u_G - u_T = \sqrt{\frac{4g(\rho_T - \rho_G)d_u}{3\rho_G C}}$$

- 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  $V_B$ , м<sup>3</sup>, определяемое по уравнению

$$V_B = F_x \Delta u \tau_T - V_u + V_{обт} = \frac{\pi d_u^2}{4} \Delta u \tau_T - \frac{\pi d_u^3}{6} + V_{обт}$$

- Реальное количество воздуха, участвующего в реакции окисления частицы угля, в пересчете на единицу массы, определяется по уравнению

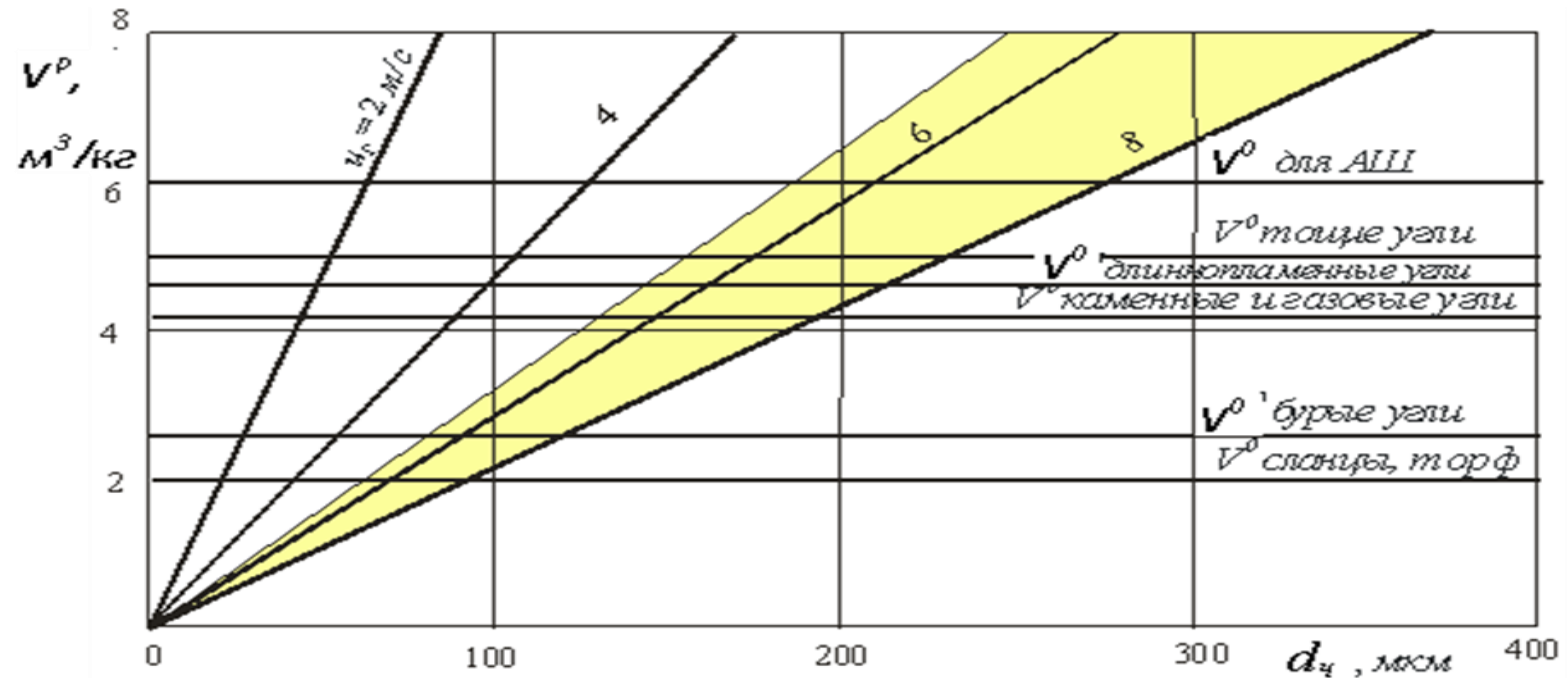
$$V^P = k \frac{V_B}{m} = k \frac{F_x \Delta u \tau_T}{V_u \rho_T} = k \frac{3 \Delta u \tau_T}{2 d_u \rho_T}$$



# Кинематика горения частицы топлива

- При горении частиц низкорекреационного топлива в равномерном потоке воздух оказывается неостребованным, 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 реальное соотношение «топливо - воздух» ( $V^p$ ), что способствует лучшему и более полному выгоранию углерода в частице угля
- При вихревом движении для частиц реальное соотношение «топливо-воздух»  $V^p$  увеличивается в 10-100 раз по сравнению с равномерным движением, что обеспечивает выгорание частицы угля.

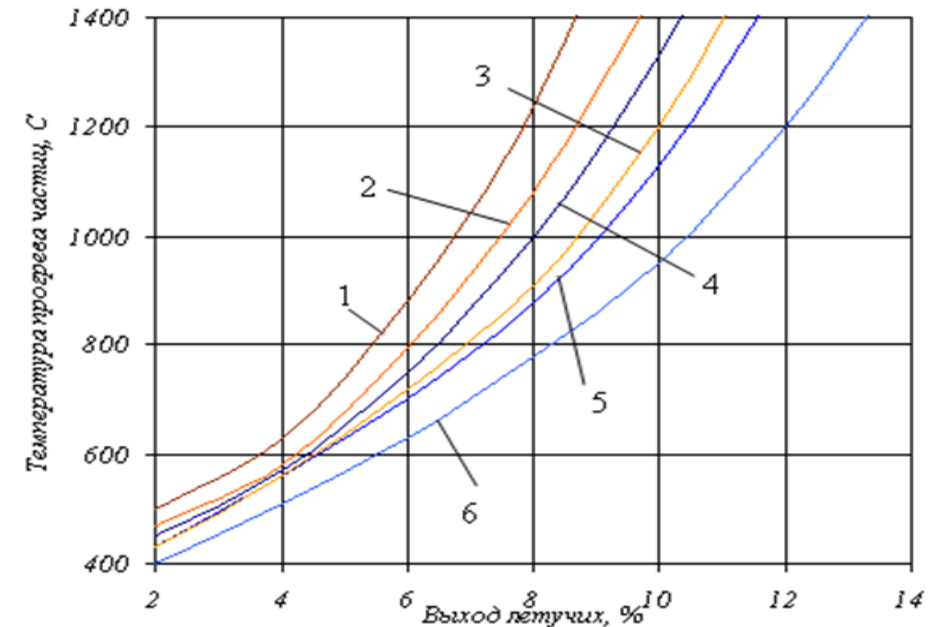


# Выгорания частицы топлива в объеме топочной камеры

- 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 выгорания летучих,
- Для низкорекреационного топлива нагрев его и воздуха от собственных летучих ( $V^c = 4\%$ ) 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 (факела), или за счет подачи дополнительного более реакционного топлива (газа, мазута).



Температура нагрева частички топлива при горении летучих ( $V^r$ , %) при температуре воздуха  $t = 350^\circ\text{C}$ .  $q_{ox} = 0,7$ : 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

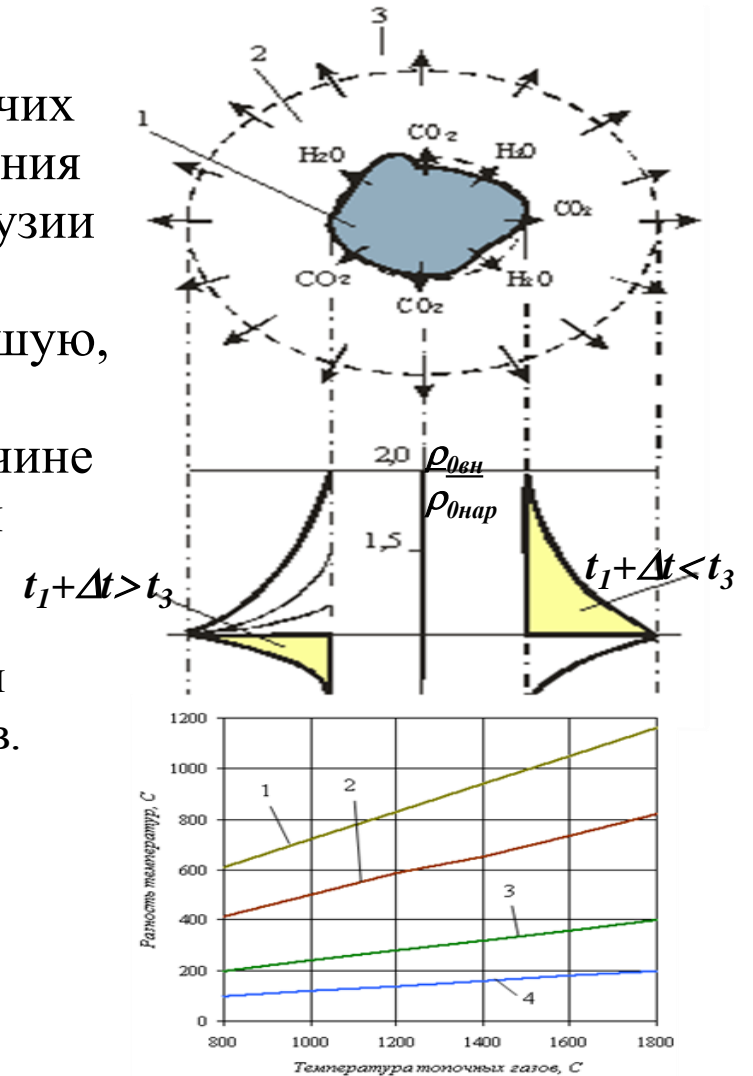
Воспламенение коксового остатка частицы при факельном сжигании **низкорреакционного** топлива осложняется тем, что тепла при горении летучих недостаточно, чтобы: 1) быстро разогреть частицу до условий воспламенения и, 2) создать необходимую разность температур для положительной диффузии воздуха к поверхности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

Разность температур между газами у поверхности частицы и окружающей средой, при которой выравниваются плотности сред в зависимости от температуры топочных газов.

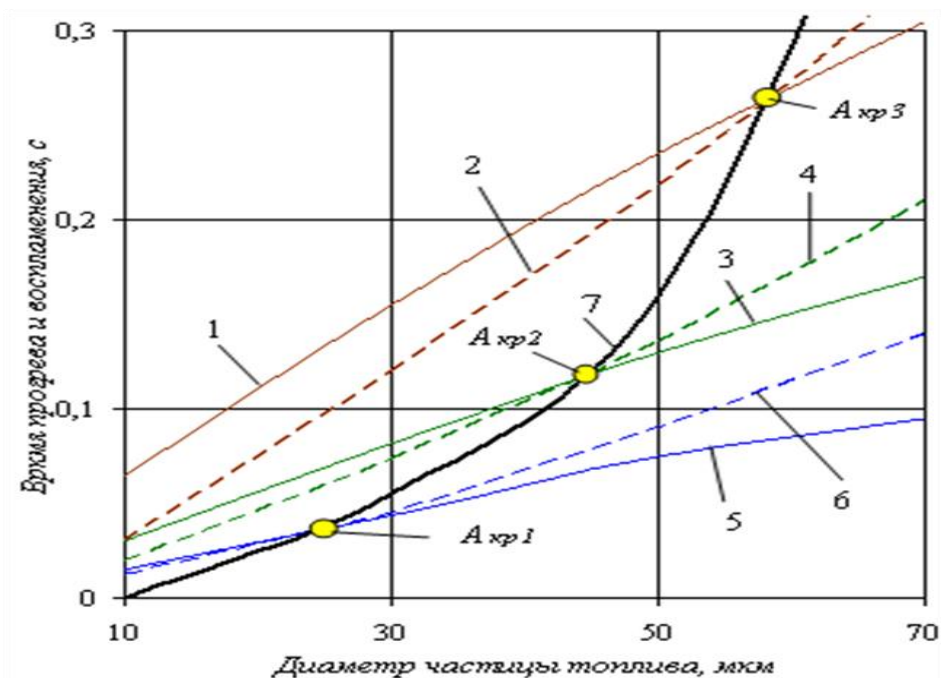
- |                                                      |                                                     |
|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| 1. $-\rho_{0\text{ вн}}/\rho_{0\text{ нар}} = 1,57;$ | 2. $-\rho_{0\text{ вн}}/\rho_{0\text{ нар}} = 1,4;$ |
| 3. $-\rho_{0\text{ вн}}/\rho_{0\text{ нар}} = 1,2;$  | 4. $-\rho_{0\text{ вн}}/\rho_{0\text{ нар}} = 1,1;$ |



# 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  $627^{\circ}\text{C}$ ,  $777^{\circ}\text{C}$  и  $927^{\circ}\text{C}$ , от размеров частиц топлива марки кузнецкие тощие угли; 7 – условие, когда временные периоды горения летучих и воспламенения кокса совпадают





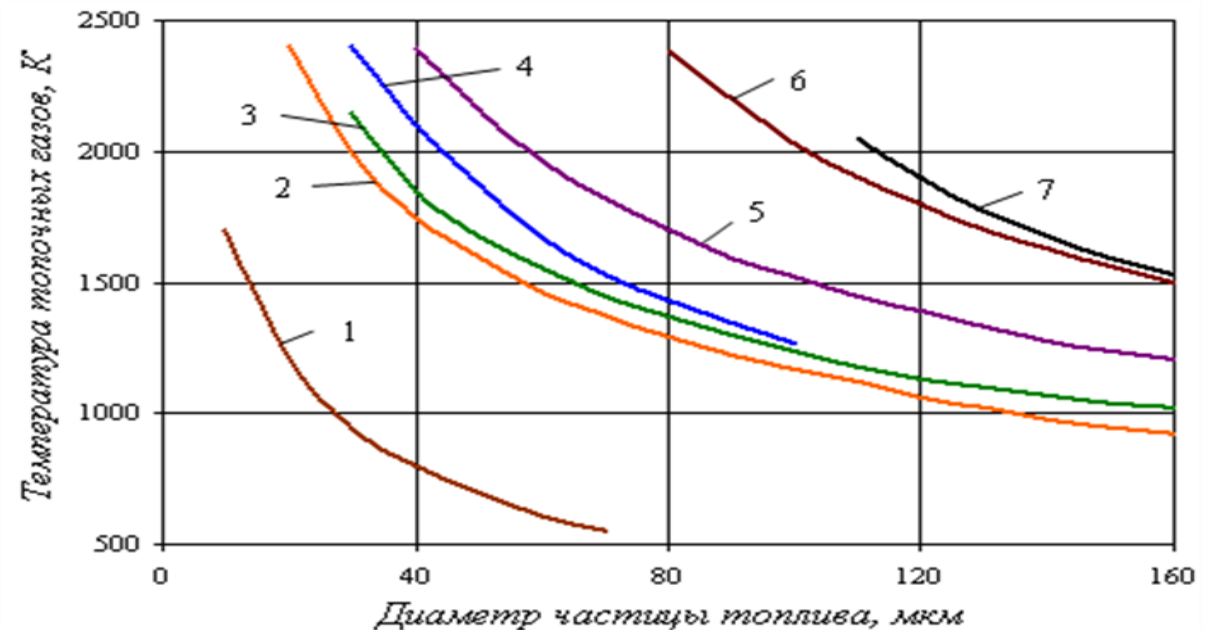
# Реальное горение

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





Рассмотрим кратко свойства горючих составляющих топлива. Углерод — основная часть топлива. Теплотворная способность его 8137 ккал/кг. Водород — при сгорании 1 кг водорода выделяется 28 905 ккал/кг тепла. Сера — при горении 1 кг выделяется 2182 ккал/кг тепла. Однако, несмотря на это, является вредным элементом, так как при нагревании металла она переходит в металл и портит его; сернистый газ, образующийся при горении серы, разъедает дымоходы, отравляет воздух, губит растительность.

Твердое топливо Каменный и древесный уголь, кокс в настоящее время считаются непригодными для нагрева металла ни в натуральном виде, ни в виде пыли, ни в виде генераторного газа, полученного путем переработки твердого топлива, из-за сложности транспортировки и хранения, невозможности обеспечения точного температурного режима нагрева металла и постоянного состава печных газов, сложности обслуживания печей и образования большого количества золы, значительного угара металла.

Жидкое топливо Сюда относятся нефть и продукты ее перегонки. Для кузнечных печей используется мазут — остатки, образующиеся при перегонке нефти после отделения ценных продуктов — бензина и керосина. Мазут является ценным топливом. По сравнению с твердым он имеет ряд преимуществ: высокая теплотворная способность, отсутствие золы, очень малое содержание серы, удобство обслуживания и регулирования печи, простая конструкция печей и сжигающих устройств. Недостатком мазута является его высокая вязкость (особенно сильно парафинистых мазутов), вследствие чего его необходимо подогревать даже летом.

Газообразное топливо Это наилучшее из всех видов топлива, применяемых для кузнечных печей. Оно не дает золы, влаги, хорошо перемешивается с воздухом, обеспечивая высокую температуру и равномерный нагрев металла. Газообразное топливо создает хорошие условия для регулирования температуры и состава печных газов. Горелки для сжигания газа просты по устройству. Преимущественное применение в нагревательных печах кузнечного производства приобретает природный газ. Перевод печей на природный газ позволяет снизить стоимость нагрева, повысить культуру производства и внедрить безокислительные методы нагрева.

1

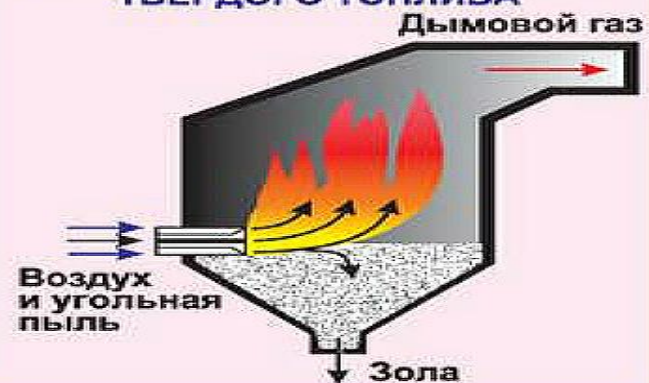
ХИМИЧЕСКОЕ ПРОИЗВОДСТВО. МЕТАЛЛУРГИЯ

# СПОСОБЫ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА

## СЖИГАНИЕ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА



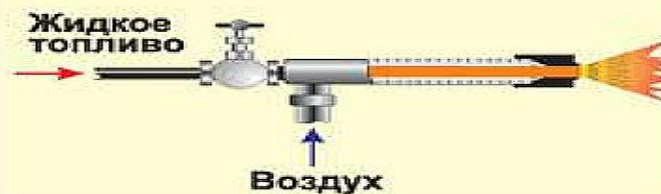
## СЖИГАНИЕ ПЫЛЕВИДНОГО ТВЕРДОГО ТОПЛИВА



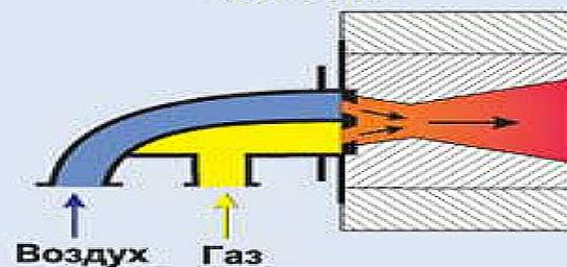
## ПЕЧЬ-ГАЗОГЕНЕРАТОР



## СЖИГАНИЕ ЖИДКОГО ТОПЛИВА



## СЖИГАНИЕ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА



**Благодарю за внимание!**