

# ФИЗИКА ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

**Лектор: Болегенова Салтанат Алихановна**

**+7 701 386 97 55**

**e-mail.: [Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz](mailto:Saltanat.Bolegenova@kaznu.kz)**

## ГОРЕНИЕ ЧАСТИЦЫ УГЛЯ

**Цель лекции** - Сформировать представление о гетерогенное и диффузионное горение.

### 11.1 Гетерогенное и диффузионное горение

Примем, в частности, что между углеродом и кислородом только одна реакция горения, протекающая на поверхности фазы, притом по первому относительно концентрации реагирующего газа порядку. Будем считать также, что процесс не сопровождается побочными реакциями в газовой фазе (окиси углерода) или на поверхности угля (восстановление углекислоты). При этом, очевидно, не учитываются многие для теории горения углерода вопросы (проникновение реакции в глубь твердой фазы и области сравнительно низких температур, рассмотренное в общем виде для пористых тел Зельдовичем и подробно — для горения угля — Хитриным, влияние озоления угля, высказанное Франк-Каменецким предположение о дробном порядке реакции угля с кислородом.

Напомним прежде всего общие элементарные представления диффузионной теории гетерогенного горения.

Схематизируя в соответствии со сказанным выше процесс горения, выделим в нем два основных составляющих явления: подвод реагирующего газа к поверхности твердой фазы и протекание на ней химической реакции.

Наблюдаемая скорость суммарного процесса горения в общем случае будет зависеть от скоростей, с которыми может происходить каждое из этих явлений в отдельности.

В установившемся процессе количество диффундирующего к поверхности угля кислорода, естественно, равно количеству его, сгорающему у реакционной поверхности, т. е. равно суммарной (наблюдаемой) скорости горения, рассчитанной по газу. Возможные ("потенциальные") скорости диффузии и реакции могут, однако, резко различаться между собой. В случае, когда одна из них значительно меньше другой, действительная скорость процесса (а также действительные скорости обоих составляющих явлений) практически совпадает с меньшей из возможных скоростей отдельных явлений, играющей в этом случае определяющую роль во всем протекании горения.

Следуя удачно предложенной Д. А. Франк-Каменецким и общепринятой в настоящее время терминологии, будем называть процесс горения "диффузионным", если скорость диффузии реагирующего газа существенно меньше возможной в этих условиях и, следовательно, нереализуемой скорости химической реакции на поверхности. Противоположный предельный случай процесса, в котором наиболее медленным, определяющим суммарную скорость, звеном является протекание реакции, а возможная в этих условиях высокая скорость диффузии не реализуется, назовем "кинетическим" горением.

Наконец, общий случай горения — при соизмеримых между собой значениях скоростей диффузии и реакции (возможных в заданной обстановке протекании процесса) — назовем "промежуточным" типом процесса.

Представления эти о предельных (диффузионной и кинетической) областях горения и общем случае (промежуточной области горения) в применении к реальным процессам имеют не только методическое, но и практическое значение. Действительно, условия протекания горения, характер влияния отдельных параметров, способы повышения

полноты горения или интенсификации процесса и т. д. резко различаются для диффузионной и кинетической областей горения; различны они и в промежуточной области при заметном, хотя и не господствующем, преобладании роли одного из факторов - скорости диффузии или химической реакции. Поэтому эффективность тех либо иных технических мероприятий по улучшению процесса горения всегда связана с предварительным выяснением наиболее медленного, тормозящего суммарный процесс явления.

Отличие между диффузионным и кинетическим горением легче всего проследить на примере реакции углерода с кислородом, хотя основные соображения применимы и к другим случаям гетерогенного процесса (реакциям на твердых катализаторах).

В диффузионной области горения протекание установившегося процесса определяется главным образом гидродинамическими свойствами системы. В частности, по законам конвективной диффузии, практически совпадающим с закономерностями конвективной теплоотдачи, основную роль играют два фактора: относительная скорость воздушного дутья и размер частиц угля. Повышение относительной скорости движения воздуха, так же как уменьшение размера частиц, приводит к интенсификации диффузии кислорода к поверхности угля.

Поскольку суммарный процесс в диффузионной области лимитируется скоростью подвода кислорода к поверхности, а возможная скорость реакции на последней много выше осуществляемой действительности (из-за недостатка кислорода), концентрация кислорода у поверхности при диффузионном горении практически равна нулю.

В кинетической области горения гидродинамические факторы, естественно, не влияют на скорость горения, поскольку у поверхности угля всегда имеется избыток кислорода: сколько-нибудь заметный перепад концентрации последнего у поверхности угля в этом случае отсутствует. Скорость кинетического горения в противоположность скорости диффузионного горения резко экспоненциально зависит от температуры; существенное значение в этом случае имеют также кинетические свойства угля (так называемая "реакционная способность").

В общем, промежуточном случае горения на суммарный процесс влияют все факторы — гидродинамические и кинетические; повышение скорости дутья или измельчение частиц увеличивает скорость диффузии, сближает ее действительное (реализуемое в данных условиях) значение с возможным и тем самым приводит к смещению суммарного процесса в сторону кинетической области. Повышение температуры в противоположность этому приводит к резкому возрастанию скорости химической реакции и смещению суммарного процесса в сторону диффузионного горения. Естественно, что наиболее распространенным является общий, промежуточный случай горения. Можно, однако, в общем виде принять, что диффузионное горение преобладает при высоких температурах, малых скоростях дутья и крупных размерах частиц; наоборот, роль кинетического горения особенно велика в области низких температур, высоких значений относительной скорости воздуха и весьма малых размеров частиц. Существенно, что ни один из этих факторов, взятый в отдельности, не определяет характера суммарного процесса; только из совместного рассмотрения всех их при учете также кинетических свойств топлива (высокая "реакционная способность" — преобладание диффузионной, низкая, т. е. инертное топливо, — кинетической области горения) можно сделать правильное заключение о действительном характере протекания горения.

Представим себе некоторый участок реакционной поверхности угля. Пусть концентрация реагирующего газа вдали от поверхности равна  $c_0$ , а на самой поверхности —  $c$ , причем  $c_0 \geq c$ .

Уравнение стационарного теплового баланса отнесем для простоты расчета к единице реакционной поверхности. Для этой цели предварительно запишем отдельно выражение для количества тепла, выделяющегося в единицу времени на единице поверхности:

$$Q_1 = \alpha_d (c_o - c)q = k_o e^{-E/RT} c \cdot q \quad (121)$$

где  $\alpha_d$  - величина, аналогичная коэффициенту конвективной теплоотдачи  $a$ , которую назовем коэффициентом диффузионного обмена или — кратко-коэффициентом газоотдачи;

$k_o$  - константа гетерогенной реакции, размерность которой для реакции первого порядка, (как и коэффициента  $\alpha_d$ ) совпадает с размерностью линейной скорости [м/сек]';

$q$  - тепловой эффект реакции, отнесенный к единице объема реагирующего газа; остальные величины имеют те же значения, что и ранее.

Заметим, что и для гетерогенного процесса, в частности для угля, величины  $k_o$  и  $E$ , входящие в уравнение закона Аррениуса ( $k_o = k_o e^{-E/RT}$ ), имеют смысл приведенных, суммарных кинетических характеристик реакции. Будем попрежнему рассматривать их как некоторые подлежащие опытному определению постоянные, не отражающие действительного механизма реакции, иногда весьма сложного. Для реакции горения углерода известны результаты значительного числа экспериментальных исследований, в которых для разных типов угля определялись с той или иной степенью точности значения  $k_o$  и  $E$ ; имеются также попытки обобщения этих данных.

Полученные в исследованиях опытные значения констант  $k_o$  и  $E$ , в особенности подробные характеристики, приведенные в монографии А.С.Предводителя и др., могут быть использованы для приближенных технических расчетов горения угля (кокса). Поэтому приведенные ранее соотношения для гетерогенного горения имеют не качественное, но и количественное значение.

Количество тепла, отводимого от единицы поверхности угля единицу времени, запишем в виде:

$$Q_{II} = \alpha(T - T_o) \quad (122)$$

где  $\alpha$  [ккал/м<sup>2</sup> сек град] — коэффициент теплоотдачи конвекцией;

$T$  и  $T_o$  — соответственно температуры газов непосредственно у поверхности угля и вдали от нее.

Первое из этих значений ( $T$ ), естественно, совпадает с температурой поверхности угля.

Приравнявая выражения (121) и (122), получим уравнение стационарного теплового баланса:

$$\alpha_d (c_o - c)q = k_o e^{-E/RT} c q = \alpha(T - T_o) \quad (123)$$

Введем, как и прежде, величину коэффициента полноты выгорания реагирующего газа:

$$\varphi = 1 - \bar{c} = 1 - \frac{c}{c_o} \quad (124)$$

где  $\bar{c} = \frac{c}{c_o}$  - безразмерная концентрация реагирующего газа.

Заметим, что величине  $\varphi$  в гетерогенном процессе -можно дать дополнительное физическое толкование. В диффузионной области горения — по определению — концентрация реагирующего газа у поверхности угля равна нулю:

$$\bar{c} = 0 \quad \varphi = 1 \quad (125)$$

В этом случае количество газа, диффундирующего к поверхности угля (т.е. величина, пропорциональная скорости выгорания угля с единицы поверхности), будет равно, очевидно, произведению  $\alpha_D c_o$ . Соответственно этому значение

$$\varphi = 1 - \frac{c}{c_o} = \frac{\alpha_D (c_o - c)}{\alpha_D c_o} \quad (126)$$

характеризует степень приближения процесса к диффузионной области горения ("меру диффузионности").

Выражению (126) можно придать еще одну форму, удобную для практических расчетов, замечая, что числитель его  $\alpha_D (c_o - c)$  представляет собой скорость сгорания, отнесенную к единице реакционной поверхности, введем дополнительное равенство для определения количества тепла, выделяющегося на единице поверхности в единицу времени:

$$Q_1 = \alpha_D (c_o - c) q = k c q = k_{эфф} \cdot c_o q$$

где

$$k_{эфф} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_D} + \frac{1}{k}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_D} + \frac{e^{ER/T}}{k_o}} \quad (127)$$

- приведенная (эффективная) константа скорости реакции первого. При этом из (126) следует:

$$\varphi = \frac{k_{эфф}}{\alpha_D}$$

т.е. коэффициент полноты сгорания равен отношению скорости реакции  $k_{эфф}$  к коэффициенту газоотдачи  $\alpha_D$ . По физическому смыслу такой прием расчета аналогичен сложению "сопротивлений" при последовательном соединении; величина  $\frac{1}{\alpha_D}$  отвечает

диффузионному сопротивлению,  $\frac{1}{k}$  - кинетическому, суммарное сопротивление

$\frac{1}{k_{эфф}} = \frac{1}{\alpha_D} + \frac{1}{k}$ . Из первого равенства в системе уравнений (123), выражающего в двух

формах записи одно и то же количество выделяющегося при реакции тепла, найдем:

$$\varphi_1 = \frac{1}{1 + \frac{c^{1/\theta}}{k_o / \alpha_D}} \quad (128)$$

Безразмерное отношение величин, характеризующих скорость реакции и скорость диффузии и  $\frac{k_o}{\alpha_D}$ , можно заменить обратным отношением характерных для этих процессов

времен, т. е. положить:

$$\tau_{ДК} = \frac{\tau_D}{\tau_K} = \frac{k_o}{\alpha_D} \quad (129)$$

где  $\tau_d$  и  $\tau_k$  - соответственно величины, характеризующие время диффузии газа к реакционной поверхности и время протекания на последней химической реакции. Таким образом, формула (128), переписанная с учетом (129) в виде:

$$\varphi_1 = \frac{1}{1 + \frac{e^{1/\theta}}{\tau_{DK}}} = \frac{\tau_{DK}}{\tau_{DK} + e^{1/\theta}} \quad (130)$$

совпадает с выражением для  $\varphi_1(\theta)$  в предыдущей главе при замене безразмерного времени  $\tau_{ПК}$  безразмерным временем  $\tau_{DK}$  (т.е. при замене времени пребывания временем диффузии  $\tau_d$ ).

Обратимся теперь к равенству первого и третьего выражений в системе уравнений (123), т. е. к выводу выражения  $\varphi_{11}(\theta)$  для отвода тепла. Из (123) с учетом (124) имеем:

$$\varphi_{11} = \frac{\alpha}{\alpha_d \cdot qc_o} (T - T_o) = \frac{E\alpha}{Rqc_o\alpha_d} (\theta - \theta_o) \quad (131)$$

Таким образом, и здесь выражение  $\varphi_{11}(\theta)$  отвечает прямой в диаграмме  $\varphi-\theta$ , что вполне естественно в связи с принятым законом конвективной теплоотдачи (т. е. адиабатического режима протекания процесса для реагирующего газа).

Рассмотрим более подробно отношение коэффициентов  $\frac{\alpha}{\alpha_d}$ , стоящее в правой части уравнения (131).

Для коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  напомним обычное в теплопередаче эмпирическое уравнение связи между критериями подобия для вынужденной конвекции:

$$\frac{\alpha d}{\lambda} = C \left( \frac{\omega d}{\nu} \right)^n \left( \frac{\nu}{a} \right)^m \quad (132)$$

где  $d$  - характерный размер;

$\lambda$ ,  $\nu$  и  $a$  - соответственно коэффициенты теплопроводности, кинематической вязкости и температуропроводности газа;

$\omega$  - относительная скорость газового потока.

Аналогично этому для коэффициента газоотдачи  $\alpha_d$  можно принять:

$$\frac{\alpha_d d}{\rho D} = C \left( \frac{\omega d}{\nu} \right)^n \left( \frac{\nu}{D} \right)^m \quad (132a)$$

где в дополнение к предыдущему  $D$  — коэффициент диффузии.

Поскольку оба явления — теплообмен и газообмен при горении - происходят в условиях одного и того же суммарного процесса, а явления вынужденной теплоотдачи и вынужденной диффузии аналогичны, значения эмпирических постоянных  $C$ ,  $n$  и  $m$  в формулах (132) и (132a) можно принять практически одинаковыми. В этом случае получим:

$$\frac{\alpha}{\alpha_d} = \frac{\lambda}{D} \left( \frac{D}{a} \right)^m = c_p \left( \frac{a}{D} \right)^{1-m} \quad (133)$$

где  $c_p$  - средняя теплоемкость  $1 \text{ м}^3$  газа. Как известно из теплопередачи, значение показателя степени  $m$  в формуле (132) для вынужденной конвекции невелико ( $m = 0,3$  —

0,4); поэтому можно приближенно с учетом равенства для газов  $a \approx D$  принять:  $\left(\frac{a}{D}\right)^{1-m} \approx 1$

Таким образом, приближенно

$$\frac{\alpha}{\alpha_D} \approx c; \quad (134)$$

а то выражение позволяет переписать уравнение (131) для  $\varphi_{11}(\theta)$  в виде:

$$\varphi_{11} = \frac{1}{\nu}(\theta - \theta_o) \quad (135)$$

где попрежнему  $\nu = \frac{Rqc_o}{Ec_p}$  - характеристика теплотворности реакции (или, например, содержания кислорода в реагирующем газе).

Как и при адиабатическом горении однородной смеси, выражение (135) можно переписать в виде:

$$\varphi_o = \frac{\theta - \theta_o}{\theta_M - \theta_o}; \quad \theta_M = \theta_o + \nu \quad (135a)$$

Существенно, что здесь подобие полей температуры и концентрации [формула (135a)] является следствием не только адиабатичности процесса, но и равенства коэффициентов переноса:  $a=D$ .

Приведем краткие итоги. Оба выражения для кривых в диаграмме  $\varphi-\theta$ , а именно кривой тепловыделения  $\varphi_1(\theta)$ -формула (130) и кривой теплоотвода  $\varphi_{11}(\theta)$ -формула (135), совпадают с аналогичными выражениями, использованными в предыдущей главе. Отличие формул (130) для гетерогенного процесса и для горения однородной смеси сводится к тому, что в первую из них входит величина  $\tau_d$  — характерное время диффузии, а во вторую —  $\tau_{\Pi}$  - время пребывания смеси в камере, в обоих случаях в виде отношения к характерному времени протекания реакции  $\tau_K$ . В дальнейшем будет показано, что это отличие приводит к различным физическим толкованиям критических явлений воспламенения и потухания в зависимости от безразмерного времени.

Для отыскания стационарных режимов процесса, как и в предыдущей задаче, следует исходить из равенства

$$\varphi_1(\theta) = \varphi_{11}(\theta), \quad (136)$$

а для определения критических условий воспламенения потухания - из системы уравнений:

$$\varphi_1(\theta) = \varphi_{11}(\theta), \quad \frac{d\varphi_1}{d\theta} = \frac{d\varphi_{11}}{d\theta} \quad (137)$$