

# Теория горения горючих дисперсных материалов

Лекция 7 по теории горения и  
взрыва для гр. ДБЖ-09

Жидкости — это вещества в конденсированном состоянии, промежуточном между твердыми и газообразными.

Жидкости, подобно твердым веществам, обладают малой сжимаемостью и большой плотностью, не обладают упругостью и легко текут. В жидкостях расстояние между молекулами — порядка размеров самих молекул, а силы межмолекулярного взаимодействия весьма значительны.

Горючими жидкостями называют жидкости, способные самовозгораться, а также возгораться от источника зажигания.

Их можно разделить на индивидуальные вещества и смеси.

К смесям относятся бензин, дизельное топливо, керосин, растительные масла различных марок. Бензин представляет собой смесь углеводородов различного строения, бесцветная жидкость с пределами кипения 30...205°C, плотностью 700...780 кг/м<sup>3</sup>; марки отечественных автомобильных бензинов.



Горение жидкостей представляет собой сложный физико-химический процесс, протекающий при взаимном влиянии кинетических, тепловых и гидродинамических явлений. Горение жидкостей происходит в газовой (паровой) фазе. В результате испарения над поверхностью жидкости образуется паровая струя, смешение и химическое взаимодействие которой с кислородом воздуха обеспечивает формирование зоны горения.

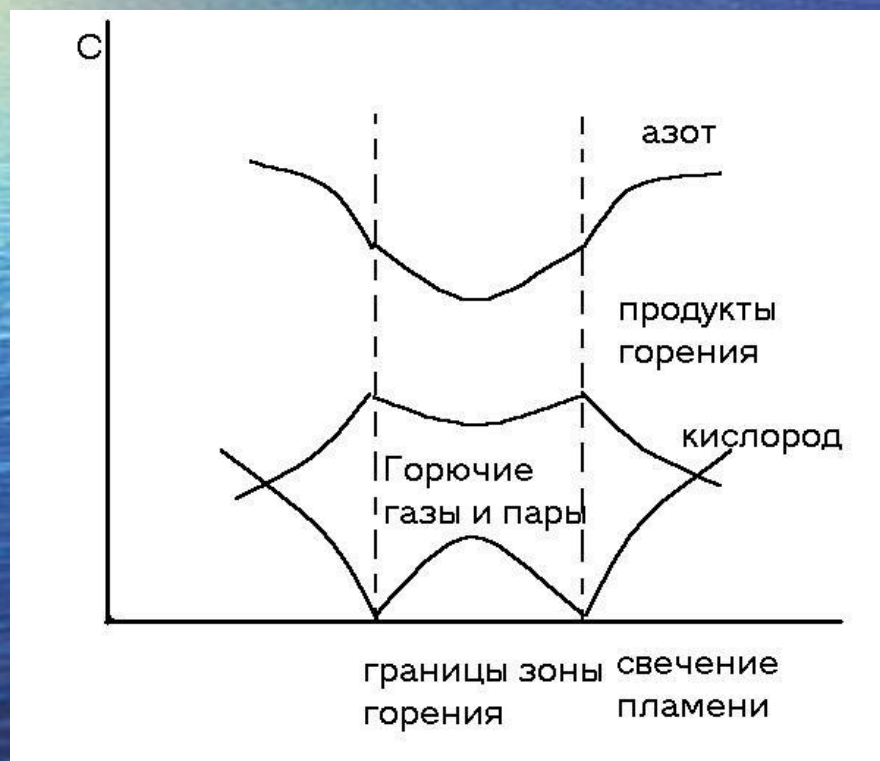


Рис. Распределение концентраций газов и паров в ламинарном и диффузионном пламени.

Важнейшей характеристикой жидкости, от которой зависит процесс горения, является температура кипения – температура, при которой происходит переход вещества из жидкого состояния в парообразное не только на поверхности, как при испарении, но и по всему объему.

Температура кипения индивидуальных углеводородов при атмосферном давлении может быть определена:

$$t_{\text{кип}} = (10\sqrt{10M} - 375) - 150$$

где  $M$  – молекулярная масса вещества.



Температурные пределы воспламенения применяют при расчете безопасных температурных режимов работы закрытых технологических аппаратов с жидкостями и летучими твердыми веществами. Безопасной (в отношении возможности образования взрывоопасных паровоздушных смесей) следует считать температуру веществ  $t_{\text{без}}, ^\circ\text{C}$  при которой соблюдается следующие неравенства:

$$t_{\text{без}} \leq t_{\text{н}} + \Delta t_{\text{н}}$$
$$t_{\text{в}} + \Delta t_{\text{в}} \leq t_{\text{без}} \leq 0,8 t_{\text{св}}$$

где  $\Delta t_{\text{н}}, \Delta t_{\text{в}}$  – допустимые величины температур, зависящие от природы жидкости,  $t_{\text{св}}$  – температура самовоспламенения жидкости.

Состояние вещества, при котором исчезает различие между его жидкой и газообразной фазами, называется критическим. Оно возникает при определенных значениях давления и температуры, называемых критическими: критической называется температура, выше которой вещество не может находиться в жидком состоянии; критическим называется давление, при котором еще сохраняется возможность сжижения газообразной фазы.

Объем, который занимает вещество в критическом состоянии, также называется критическим. Критические параметры вещества связаны следующим соотношением:

$$Z_{кр} = P_{кр} \cdot V_{кр} / RT_{кр}$$

R – универсальная газовая постоянная;  $Z_{кр}$  – константа, равная 0,375 (для газов, удовлетворяющих уравнению состояния Ван-дер-Ваальса; для паров углеводородов тяжелее пропана – 0,27).



По способам хранения и транспортирования вещества можно разделить на четыре основные категории:

вещества, у которых критическая температура ниже температуры окружающей среды, называются криогенными, для сжижения их необходимо охладить и сжать. Поведение разлитой криогенной жидкости подобно поведению воды, налитой на раскаленную поверхность: капли жидкости парят над поверхностью подобно пузырькам кипящей воды;

вещества, у которых критическая температура выше, а точка кипения ниже температуры окружающей среды. Для сжижения их достаточно сжать, они отличаются способностью к "мгновенному испарению", то есть при разгерметизации емкости части жидкости испаряется, а оставшаяся охлаждается до точки кипения при атмосферном давлении;

вещества, у которых критическое давление выше атмосферного и точка кипения выше температуры окружающей среды, находятся при атмосферном давлении в жидком состоянии, в холодную погоду при атмосферном давлении бутан – жидкость, а этиленоксид в жаркую погоду – сжиженный газ;

вещества, содержащиеся при повышенных температурах. Жидкости 3-й категории, указанные выше, в рабочих условиях могут вести себя подобно сжиженным газам, если они содержатся при подводе тепла и под давлением при температурах выше их атмосферной точки кипения. Характерным примером может служить водяной пар в котлах.

Горение твердых веществ. В условиях большинства пожаров горят твердые вещества, которые широко используются в различных отраслях и быту. К ним относятся органические и неорганические вещества и материалы.



Рис. Строение ламинарного пламени



# Горение органических материалов.

## Состав некоторых целлюлозных материалов

Горючий материал	Элементарный состав, %				Содержание влаги и золы, %	
	C	H	O	N	влага	зола
дуб	46,08	5,50	38,18	1,14	7,0	2,1
сосна	46,00	5,50	39,20	0,90	7,0	1,1
солома	39,06	4,70	42,20	1,01	8,0	5,0
хлопок	42,40	5,92	46,60	0,58	4,0	0,5

## Состав неконденсирующихся газов, образующихся при различной температуре разложения древесины

Характеристика	Температура разложения древесины, °C					
	200	300	400	500	600	700
состав, % (об.) диоксида углерода	75,00	56,02	49,36	43,20	40,98	38,56
оксид углерода	25,00	40,17	34,00	29,01	27,20	25,19
метан	-	3,75	14,31	21,72	23,42	24,94
этилен	-	-	0,86	3,68	5,74	8,50
водород	-	-	1,47	2,34	2,66	2,51
выход газов на 100 кг древесины, м <sup>3</sup>	0,4	5,6	9,5	12,8	14,3	16,0

Полимеры отличаются высоким содержанием углерода, и большинство из них не содержит кислород, поэтому для их горения необходим значительный объем воздуха 10...12 м<sup>3</sup>/кг. Горение полимеров происходит с образованием продуктов неполного сгорания – сажи.

**Элементарный состав некоторых полимеров, %**

Полимерный материал	С	Н	О	N
изопреновый каучук	88,25	11,75	-	-
капрлактам	63,7	9,75	14,2	12,35
натуральный каучук	88,25	11,75	-	-
полипропилен	85,4	14,6	-	-
полиакрилаты	55,9	6,9	37,2	-
полиэтилен	85,8	14,2	-	-
фенолформальдегидная смола	78,8	5,05	16,15	-



При горении жидкости, массовую скорость выгорания твердых веществ относят к единице поверхности горения, то есть поверхности горючего вещества, с которой в данный момент времени в зону горения поступают пары и газы. Такая массовая скорость выгорания твердых веществ называется удельной и не зависит от размеров поверхности твердых веществ и изменяется в зависимости от температуры и влажности веществ.

Практическое определение удельной скорости выгорания твердых материалов очень затруднено, так как поверхность горения многих из них не представляет ровную плоскость. В связи с этим расчет скорости выгорания ведут на единицу площади проекции поверхности горения на горизонтальную плоскость.

### Удельная массовая скорость выгорания некоторых материалов

Горючий материал	Удельная массовая скорость выгорания, кг/(см <sup>2</sup> ·мин) при температуре, °С			Принимаемая скорость выгорания, кг/(см <sup>2</sup> ·мин)
	где	500	700	
древесина W=10%	0,34	0,45	0,65	0,5
стеклопластик	0,74	0,93	1,10	1,0
каучук СКИ-3	0,45	0,85	-	1,12

Перемещение фронта пламени по поверхности твердых веществ называется распространением горения и характеризуется скоростью распространения горения, определяемой по формуле:  $U_g = l/\tau$

Горючая пыль – это дисперсная система, состоящая из твердых частиц размером менее 850 мкм, находящихся во взвешенном или осевшем состоянии в газовой среде, способная к самостоятельному горению в воздухе нормального состава.

Пыли по общей классификации коллоидно-дисперсных систем относятся к аэрозолям, в которых дисперсной средой является воздух, а дисперсной фазой – твердое вещество в раздробленном состоянии.

Пыль может образовываться при механическом измельчении твердых тел, а также при получении порошкообразных и пылеобразных веществ методами кристаллизации и сублимации. Осевшая пыль называется аэрогелем (пыль – гель), пыль, находящаяся во взвешенном состоянии, называется аэрозолем (пыль – аэровзвесь); аэрогели и аэровзвеси являются гетерогенными системами. Пыли горючих веществ являются пожаро- и взрывоопасными.



ГОСТ 12.1.044-84 ССБТ регламентирует следующие показатели пожаро- и взрывоопасности горючих аэрозолей и аэрогелей:

для горючих пылей во взвешенном состоянии: нижний концентрационный предел распространения пламени (НКПР), минимальная энергия зажигания, максимальное давление взрыва, скорость нарастания давления при разрыве, минимальное взрывоопасное содержание кислорода;

для пылей, находящихся в осевшем состоянии: температура воспламенения, температура самовоспламенения, температура самонагревания, температура тления, температурные условия теплового самовозгорания, минимальная энергия зажигания, способность гореть и взрываться при взаимодействии с водой, кислородом воздуха и другими веществами.

Кондуктивный механизм распространения горения (теплопроводный), продукты горения нагревают воздух, и воздух нагревает частицу до температуры воспламенения, так распространяется горение. В аэровзвесах много воздуха и мало твердой фазы; твердая фаза – является источником тепла, воздух основной поглотитель этого тепла и является адиабатической характеристикой.

Скорость распространения горения должна зависеть от размеров частиц в существенной мере; частицы, горящие в газовой фазе, горят по закону Средневского: время горения пропорционально квадрату диаметра частиц

$$t=k \cdot d^2$$



Можно оценить влияние диаметра частиц на скорость горения частицы, зная толщину прогретой зоны:

$$L = U_M \cdot t$$

$$L = \frac{x}{U_M}$$

отсюда

$$U_M^2 = \frac{x}{t} = \frac{x}{k \cdot d^2}$$

$$U_M \sim \frac{1}{d}$$

Эта зависимость выдерживается в диапазоне с малым диаметром частиц (до 10 мкм), что свидетельствует о справедливости кондуктивного механизма горения. Для более крупной частицы закономерность не сохраняется, аэрозоли с крупными частицами горят быстрее, чем по кондуктивному закону, особенно это проявляется в крупномасштабных системах.

Существует смешанный механизм распространения пламени: кондуктивно-радиационный (предложенный Нуссельтом); тепло передается не только теплопроводностью, но и радиационным способом (излучением). Кассель предложил расчет скорости горения:

$$U_f = \frac{\frac{\chi_g \cdot c_g \cdot (T_2 - T_g)}{L \cdot f} + K_B \cdot (T_2^4 - T_g^4)}{C_n \cdot (T_g - T_0)}$$

где  $\frac{\chi_g \cdot c_g \cdot (T_2 - T_g)}{L \cdot f}$  – выражение, характеризующее передачу тепла кондукцией;  $K_B \cdot (T_2^4 - T_g^4)$  –

выражение, характеризующее передачу тепла излучением;  $\chi_g$  – температуропроводность воздуха;  $c_g$  – теплоемкость воздуха при постоянном объеме;  $T_2$  и  $T_g$  – температуры горения и воспламенения;  $L \cdot f$  – толщина зоны горения (зависит от диаметра частиц);  $T_0$  – начальная температура аэрозвеси;  $K_B$  – постоянная Больцмана;  $C_n$  – теплоемкость пыли.



При горении в трубе происходит движение исходной газовой смеси и снизу вверх происходит увеличение концентрации (частицы аэрозвеси оседают под действием движения газа и не воспламеняются, а попадают в зону продуктов горения, что приводит к увеличению скорости горения).

Нижний концентрационный предел распространения пламени можно рассчитать по формуле Джекниля:

$$НКПР = \frac{(T_{cв} - T_0) \cdot \rho_{в} \cdot c_{в}}{\Delta H_z - (T_{cв} - T_0) \cdot C_n}$$

где  $(T_{cв} - T_0) \cdot C_n$  – это тепло необходимое, чтобы нагреть 1 г массы пыли до температуры самовоспламенения;  $T_{cв}$  – температура самовоспламенения;  $T_0$  – начальная температура смеси;  $\rho_{в}$ ,  $c_{в}$  – плотность и теплоемкость воздуха;  $\Delta H_z$  – теплота горения пыли в воздушной смеси;  $C_n$  – теплоемкость пыли.

Формула для расчета нижнего концентрационного предела распространения пламени для органических соединений предложена Цером (для расчета процессов горения металлов не применима):

$$НКПР = \frac{100 \cdot M}{a_1 \cdot \beta \cdot \epsilon_1 \cdot (\Delta H_z - \sum V_i \cdot \Delta H_{i1000})}$$

$M$  – молекулярная масса пыли;  $\beta$  – стехиометрический коэффициент кислорода в реакциях горения;  $\Delta H_z$  – теплота сгорания;  $V_i$  – стехиометрический коэффициент продуктов сгорания;  $\Delta H_{i1000}$  – тепло содержание продуктов сгорания (энтальпия) при нагревании их от 298 до 1000 К;  $a_1$  и  $\epsilon_1$  – эмпирические коэффициенты для данного класса горючих материалов.

Формула для расчета нижнего концентрационного предела для органических соединений:

$$НКПР = a - \frac{b}{\Delta H_z}$$

где  $a$  и  $b$  эмпирические коэффициенты.