

# Лекция 5

# Теория горения и взрывов

доктор технических наук, профессор  
Лепешкин Олег Михайлович

---

# **Тема: Кинетическая реакция горения**

## **Учебные вопросы**

- **Пределы воспламенения горючей смеси**
  - **Методы расчета температурных пределов воспламенения**
  - **Распределение энергии при взрыве**
-


## Учебная литература:

- 1. Зинченко А.В. Теория горения и взрыва, 2016.  
URL:  
[http:// elib.spbstu.ru/dl/2/s16-138.pdf](http://elib.spbstu.ru/dl/2/s16-138.pdf)**
-



# **1. Пределы воспламенения горючей смеси**


---



Взрывоопасность горючей смеси возникает тогда, когда количество газов или паров в воздухе составляет определенные величины (не больше и не меньше). Эти величины определяют концентрационные пределы воспламенения.

**Пределы воспламенения** - это предельные концентрации горючего вещества в воздухе или другой окислительной среде, при которых еще возможно распространение пламени по всей горючей смеси от источника зажигания.

---

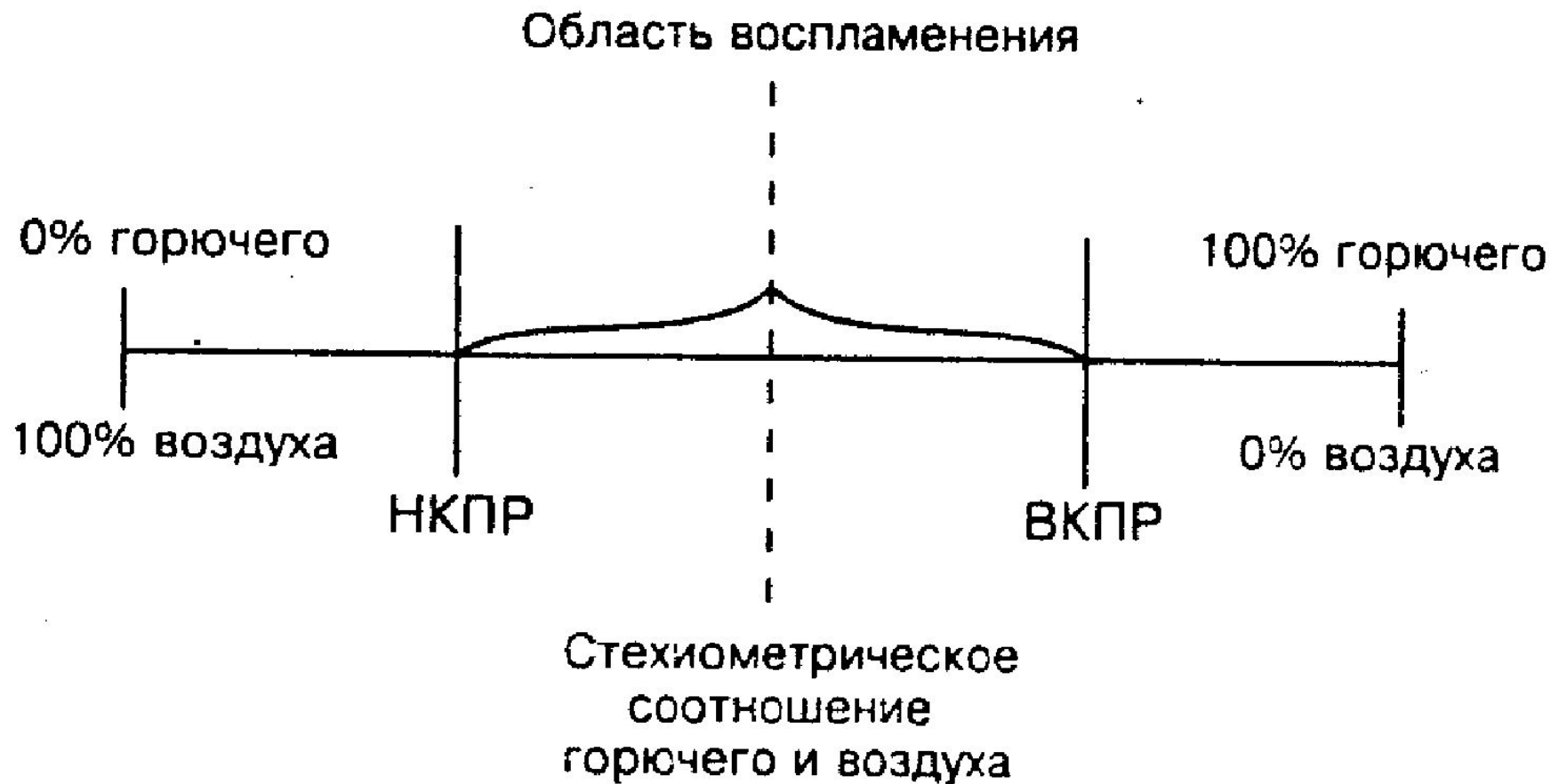


Концентрационные пределы воспламенения обозначаются КПВ.

Концентрационные пределы воспламенения называют также **пределами взрываемости**.

Различают **нижний (НКПВ) и верхний (ВКПВ)** пределы, характеризуемые соотношением минимального и максимального содержания горючего вещества в смеси.

---



Объемн. % газа (метана) в воздухе





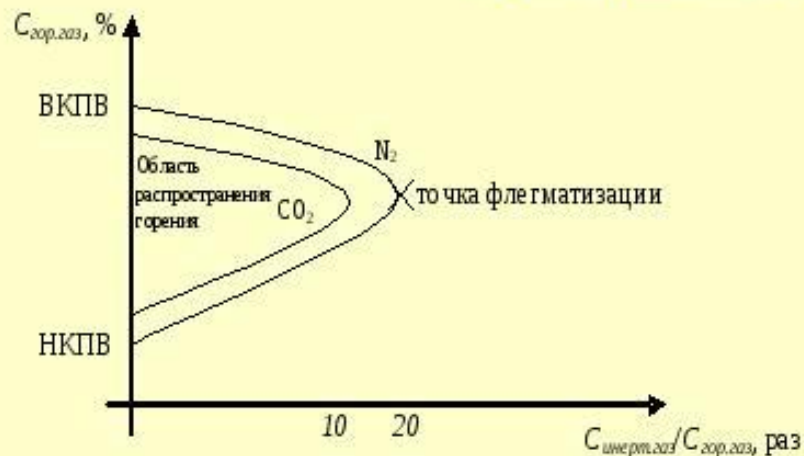
## 2 Температурные пределы воспламенения (распространения пламени)

*Нижний (верхний) температурный предел распространения пламени*

*(Н(В)ТТР<sub>ПАРОВ</sub>, °С)* – температура вещества, при которой его

насыщенные пары образуют в окислительной среде концентрации, равные нижнему (верхнему) концентрационному пределу распространения пламени

## 3 Диаграммы воспламеняемости



**Ингибирование** – введение добавок, являющихся отрицательными катализаторами цепных реакций → сужаются пределы воспламенения

### **Флегматизация**

При разбавлении горючего газа инертным постепенно снижается температура горения смеси вплоть до достижения температуры воспламенения. При большем разбавлении смесь становится негорючей при любом соотношении горючего и окислителя

**Точка флегматизации** – точка, в которой при незначительном увеличении концентрации инертного газа горение прекратится

Нижний и верхний КПВ могут быть определены по аппроксимационной формуле

$$\varphi_{н(в)} = \frac{100}{an + b}, \quad (2.2)$$

где  $n$  – стехиометрический коэффициент при кислороде в уравнении химической реакции;  $a$  и  $b$  – эмпирические константы, значения которых приведены в табл. 2.1.

Т а б л и ц а 2.1

Концентрационные пределы воспламенения	Значения коэффициентов	
	$a$	$b$
Нижний	8,684	4,679
Верхний		
$n \leq 7,5$	1,550	0,560
$n > 7,5$	0,768	6,554

**Верхний концентрационный предел воспламенения (ВКПВ)** - это наибольшая концентрация горючих паров, газов или пыли в смеси с воздухом, при которой смесь еще способна воспламеняться от источника зажигания с распространением пламени на весь ее объем.

Верхний концентрационный предел воспламенения характеризуется избытком горючего и малым количеством воздуха. При воспламенении такой газовой смеси часть тепла химической реакции расходуется на нагрев не участвующего в реакции горючего, поэтому продукты горения нагреваются не до максимальной температуры, при этом давление может составлять 3-4 кг/см<sup>2</sup>, что грозит опасностью взрыва.

**Смесь воздуха с горючим газом, паром или пылью на нижнем концентрационном пределе воспламенения содержит избыток воздуха, а при верхнем концентрационном пределе - недостаток воздуха.**

---

**Интервал концентраций газов или паров в воздухе между нижним и верхним концентрационными пределами воспламенения называется областью воспламенения.**

Область воспламенения газов (паров) в воздухе определяется при атмосферном давлении 760 мм рт. ст. (0,1 М Па) и характеризуется тем, что внутри нее все смеси горючего с воздухом способны воспламеняться от внешнего источника зажигания с последующим распространением горения на весь объем смеси.

**Область воспламенения обозначается  $\Phi$ . Для области воспламенения справедливо выражение:**

$$\text{НКПВ} \leq \Phi \leq \text{ВКПВ}.$$

---

Концентрационные пределы воспламенения зависят от следующих факторов:

- температуры смеси (повышение температуры расширяет диапазон взрываемости за счёт увеличения энергии активации);
- давления смеси (обычно повышение давления не сказывается на НКПР, но ВКПР может сильно возрасть);
- объема и диаметра сосуда, негорючие добавки — флегматизаторы.

*Значения НКПР и ВКПР по горючим газам и парам приведены в ГОСТ 51330.19-99 (МЭК 60079-20-96).*

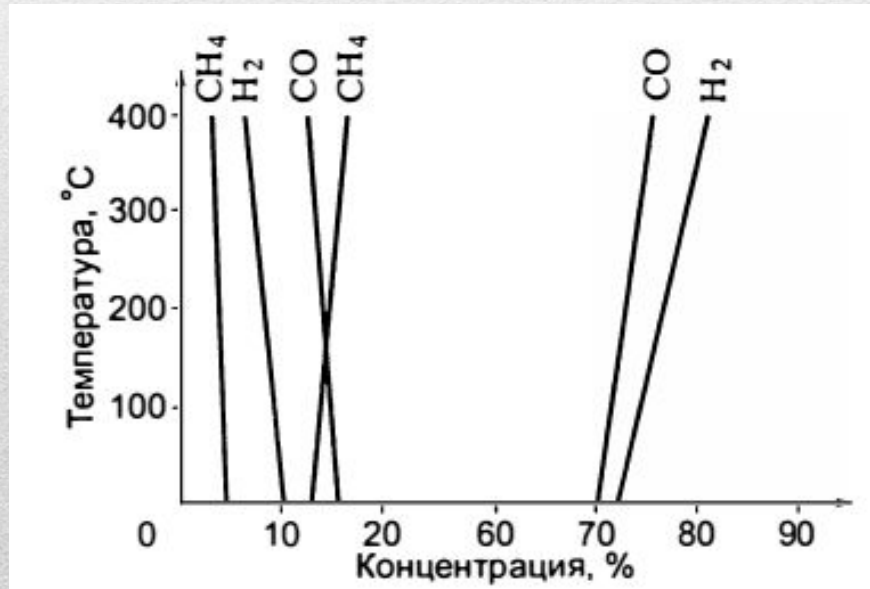
---

# Температура смеси

Начальная температура горючей смеси влияет на пределы воспламенения. С повышением температуры увеличивается скорость химической реакции, и область воспламенения расширяется. Наиболее сильное влияние оказывает температура на верхний концентрационный предел воспламенения (ВКПВ).

С повышением начальной температуры горючей смеси увеличивается скорость горения при предельных концентрациях этих смесей.

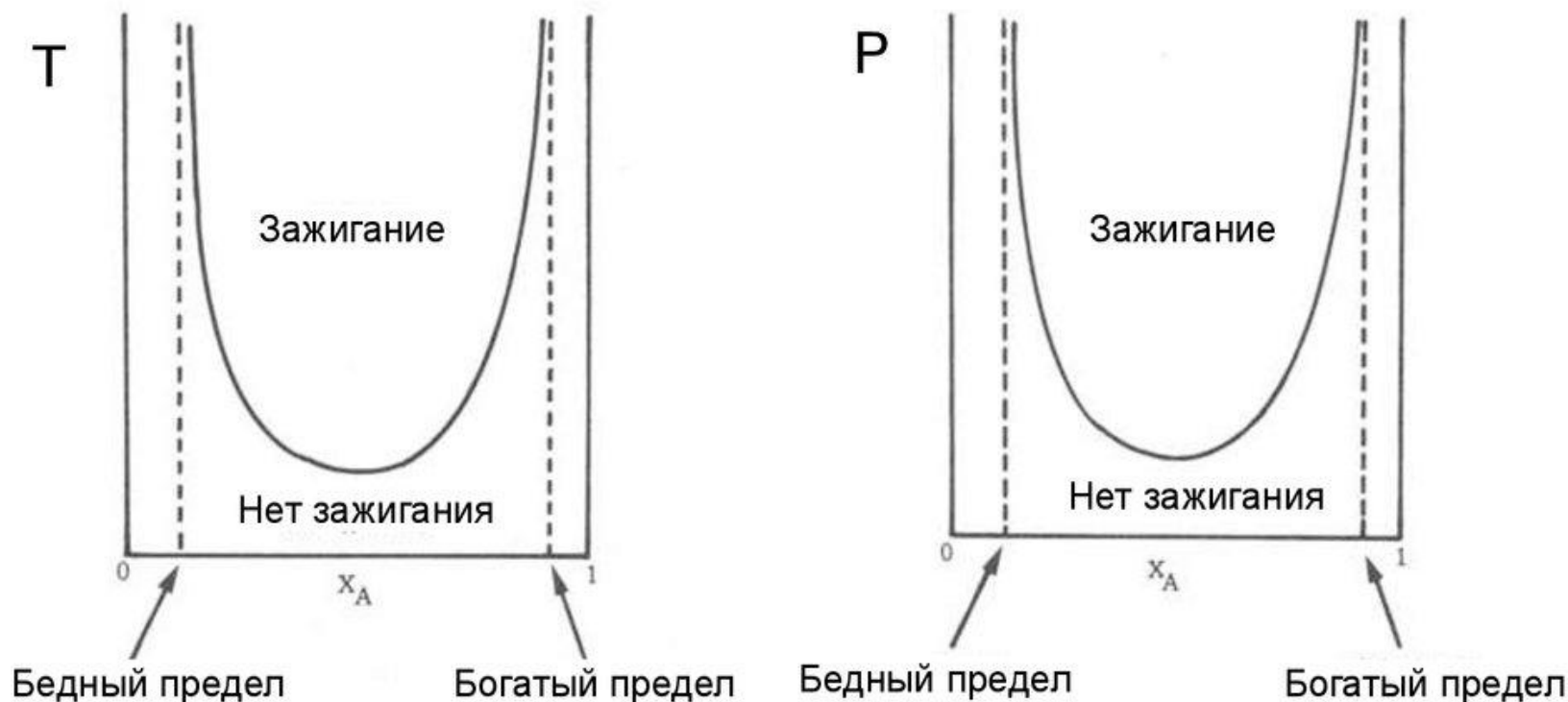
Смеси, сильно разбавленные горючим или воздухом и неспособные гореть при низких температурах, напротив, становятся горючими при высоких температурах.



Концентрационные пределы воспламенения, %

---

## Влияние температуры и давления на концентрационные пределы воспламенения смеси



С уменьшением температуры и давления верхний и нижний пределы концентрации топлива в смеси сближаются; при очень низких  $T$  и  $P$  воспламенение невозможно ни при каких условиях.



# **2. Методы расчета температурных пределов воспламенения**

---



и  $p_{\text{в}}$  (мм рт. ст.) насыщенного пара, соответствующее нижнему и верхнему температурным пределам воспламенения:

$$p_{\text{н}} = 768/4,76 (n - 1) + 1;$$

$$p_{\text{в}} = 3040/4,76 n + 4,$$

где  $n$  — число атомов кислорода, необходимое для полного сгорания одной молекулы горючего вещества.

Далее по значению давления находят температурные пределы по справочным данным в зависимости давления насыщенного пара от температуры (табл. 14, прил. III).

Температурные пределы воспламенения (ТПВ) жидкостей рассчитывают по температуре кипения:

$$t_{\text{н(в)}} = k t_{\text{кип}} - l,$$

где  $t_{\text{н(в)}}$  — нижний (верхний) температурный предел воспламенения;

$t_{\text{кип}}$  — температура кипения, °С;

$k, l$  — константы для определенных групп (гомологических рядов) жидкостей (табл. 15, прил. III).

В случае если неизвестна температура кипения исследуемого вещества при нормальном атмосферном давлении, значение нижнего температурного предела распространения пламени  $t_{\text{н}}$  вычисляют по формуле

$$t_{\text{н}} = t_{\text{всп}} - C,$$

где  $t_{\text{всп}}$  — экспериментальное значение температуры вспышки, °С;

$C$  — константа, равная 2 °С, если для расчета используют значение  $t_{\text{всп}}$  в закрытом тигле, и равная 8 °С, если для расчета используют значение  $t_{\text{всп}}$  в открытом тигле. Средняя квадратическая погрешность расчета по этой формуле не превышает 12 °С.

Температурные пределы воспламенения могут быть определены по известным значениям концентрационных пределов воспламенения:

$$p_{\text{н(в)}} = \frac{\varphi_{\text{н(в)}} p_{\text{о}}}{100}, \quad (1.43)$$

где  $p_{\text{н(в)}}$  — давление насыщенного пара, соответствующее нижнему (верхнему) концентрационному пределу воспламенения;

Температурные пределы могут быть рассчитаны. Расчетный метод заключается в следующем. Первоначально вычисляют давление  $P_{\text{н}}$

$\varphi_{н(в)}$  — нижний (верхний) концентрационный предел воспламенения;

$p_0$  — атмосферное давление.

Определяют температуру вещества, при которой достигается данное давление по *уравнению Антуана*:

$$\lg p = A - \frac{B}{C + t}, \quad (1.44)$$

где  $A, B, C$  — константы Антуана (табл. 10, прил. III);

$t$  — температура, °С (температурные пределы).

Температура вещества при определенном давлении приведена в табл. 14, прил. III. Эта температура будет являться соответственно нижним ил верхним пределом воспламенения.

В том случае если известна зависимость давления насыщенного пара от температуры, значение нижнего или верхнего температурных пределов распространения пламени ( $t_{в(н)}$ ) в °С вычисляют по соответствующему значению концентрационного предела распространения пламени ( $\varphi_{в(н)}$ ) по формуле

$$t_{в(н)} = \frac{B}{A - \lg(\varphi_{в(н)} p_0 - 0,01)} - C_A, \quad (1.45)$$

где  $A, B, C_A$  — константы уравнения Антуана;

$p_0$  — атмосферное давление, кПа.

Значение  $\varphi_{в(н)}$  может быть рассчитано по методам расчета концентрационных пределов воспламенения или принято по табл. 11—13, прил. III или формуле (1.45).

В случае если неизвестна зависимость давления насыщенного пара от температуры, для веществ, состоящих из атомов С, Н, О, N, значение нижнего или верхнего температурных пределов ( $t_n$ ) вычисляют по формуле


$$t_{н(в)} = a_0 + a_1 t_{кип} + \sum_{j=2}^m a_j I_j, \quad (1.46)$$

где  $a_0$  — размерный коэффициент, равный  $-62,46$  °С для нижнего и  $-41,43$  °С для верхнего пределов;

$a_1$  — безразмерный коэффициент, равный  $0,655$  для нижнего и  $0,723$  для верхнего пределов;

$a_j$  — эмпирические коэффициенты, характеризующие вклад  $j$ -х структурных групп, приведены в табл. 1.13

Таблица 1.13. Коэффициенты  $a_j$ 

Вид структурной группы	$a_j, ^\circ\text{C}$	
	$t_n$	$t_b$
C—C	0,909	-1,158
C=C	2,66	-4,64
C—H	0,009	0,570
C—O	0,110	1,267
C=O	5,57	5,86
O—H	19,57	17,80
	-4,40	-4,60

Среднее квадратическое отклонение расчета по формуле (1.46) составляет  $9^\circ\text{C}$ .

НТПВ (температура вспышки) химических соединений одного класса изменяется в зависимости от физических свойств веществ в гомологическом ряду. На примере спиртов проследим закономерности изменения температуры вспышки. Как видно из табл. 1.14, температура вспышки повышается с увеличением молекулярного веса, температуры кипения и плотности. Эти закономерности в гомологическом ряду говорят о том, что температура вспышки связана с физическими свойствами веществ и сама является **физическим параметром**. Необходимо отметить, что закономерность изменения температуры вспышки в гомологическом ряду нельзя распространять на жидкости, принадлежащие к разным классам органических соединений.

Таблица 1.14. Температура кипения и вспышки некоторых спиртов

Наименование спирта, формула	Молекулярный вес	Плотность, $\text{г/м}^3$	Температура, $^\circ\text{C}$	
			кипения	вспышки
Метиловый $\text{CH}_3\text{OH}$	32	0,791	64,7	7
Этиловый $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	46	0,789	78,4	11
н-Пропиловый $\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	60	0,80	97,8	20
н-Бутиловый $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$	74	0,810	118,0	31
н-Амиловый $\text{C}_5\text{H}_{11}\text{OH}$	88	0,817	137,0	46

# Методы определения горючести

Коэффициент горючести  $K_r$  является безразмерным коэффициентом и служит для определения горючести вещества и расчета температуры вспышки вещества, исходя из температуры кипения. Коэффициент горючести можно рассчитывать по следующей формуле:

$$K_r = 4n_C + 4n_S + n_H + n_N - 2n_O - 2n_{Cl} - 3n_F - 5n_{Br},$$

где  $n_C, n_S, n_H, n_N, n_O, n_{Cl}, n_F, n_{Br}$  — соответственно число атомов углерода, серы, водорода, азота, кислорода, хлора, фтора и брома в молекуле данного вещества.

Если коэффициент горючести  $K_r$  меньше единицы ( $K_r < 1$ ), то вещество негорючее. Если коэффициент горючести больше единицы ( $K_r > 1$ ), вещество является горючим.

---

# **3. Распределение энергии при взрыве**

---

# Распределение энергии при взрыве

1. Энергия волны
2. Остаточная энергия в атмосфере («потерянная энергия»)
3. Кинетическая и тепловая энергии осколков оболочки
4. Кинетическая энергия источника
5. Тепловая (потенциальная) энергия источника
6. Излучение

It 2 — тепловая и кинетическая энергии источника; 3—4 — тепловая и кинетическая энергии осколков оболочки; 5 — остаточная энергия среды; 6 и 7 — тепловая и кинетическая энергии собственно волны; 8 — энергия излучения; 9 — энергия волны в зоне слабого взрыва.

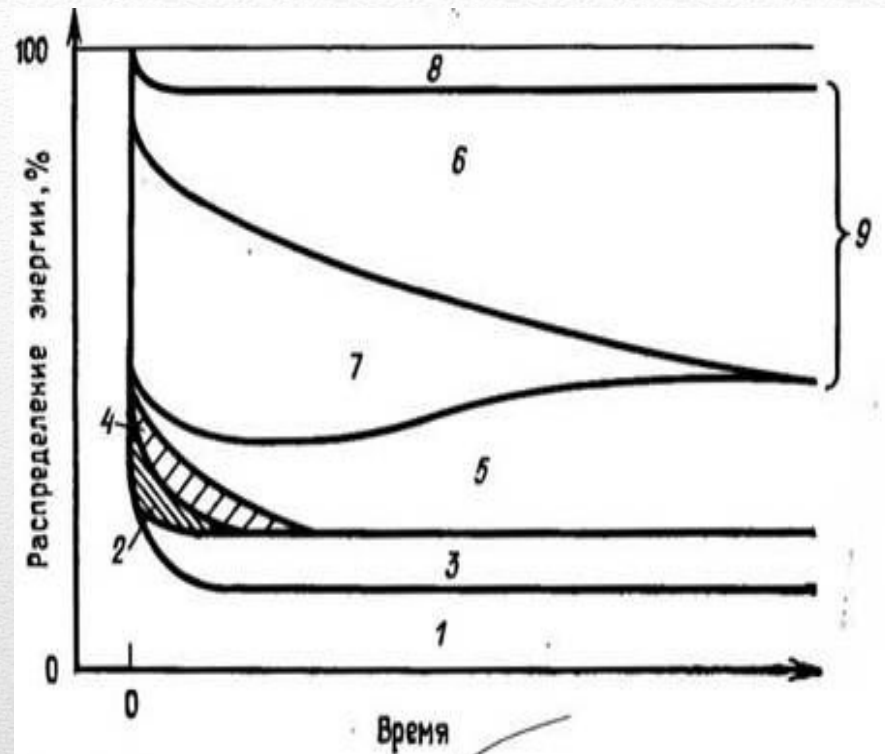


Рис. 2.6. Схема распределения энергии во взрывной волне во времени [612].



