

# ПРОМЫШЛЕННАЯ ВЕНТИЛЯЦИЯ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ

**ТЕМА:** ТЕПЛО- И ВЛАГООБМЕН ВОЗДУХА С ВОДОЙ.  
ПОСТУПЛЕНИЕ В ВОЗДУХ ПОМЕЩЕНИЙ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ И  
ПЫЛИ. ВЗРЫВООПАСНОСТЬ ГАЗОВ И ПАРОВ

ГУСЕВ К.П.

Лекция

4

# 5 ТЕПЛО- И ВЛАГООБМЕН ВОЗДУХА С ВОДОЙ

## 5.1 ТЕПЛО- И ВЛАГООБМЕН НА СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

Процессы тепло- и влагообмена на свободной поверхности воды рассчитывают для определения количества тепла и влаги, поступающих в воздух (в помещении или в поверхностно-испарительных увлажнителях вентиляционных установок и кондиционеров).

Для определения поступлений явного конвективного тепла  $Q_{\text{я}}$ , Вт, используется зависимость

$$Q_{\text{я}} = \alpha(t_{\text{пов}} - t_{\text{в}})F$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>К);  $t_{\text{пов}}$  — температура поверхности, °С;  $t_{\text{в}}$  — температура окружающей среды, °С;  $F$  — площадь поверхности испарения, м<sup>2</sup>.

Аналогичные выражения применяют для определения влагопоступлений  $W$ , кг/ч:

$$W = \beta_p (p_{\text{пов}} - p_{\text{в}}) F \quad \text{ИЛИ}$$

$$W = \beta (C_{\text{пов}} - C_{\text{в}}) F$$

где  $\beta_p$  и  $\beta$  — коэффициенты влагообмена, отнесенные соответственно к разности парциальных давлений, кг/(ч·м<sup>2</sup>·Па), и к разности концентраций, м/ч;  $p_{\text{пов}}$  и  $p_{\text{в}}$  — парциальное давление водяного пара соответственно над поверхностью испарения и в окружающем воздухе, Па;  $C_{\text{пов}}$  и  $C_{\text{в}}$  — концентрация водяного пара соответственно над поверхностью испарения и в окружающем воздухе, кг/м<sup>3</sup>.

Из основного уравнения газового состояния устанавливается следующая зависимость между концентрацией и парциальным давлением:

$$C = 2,16 \cdot 10^{-3} \frac{p}{273 + t}$$

Для расчета по данным уравнениям необходимо определить коэффициенты тепло- и влагообмена, а в ряде случаев и температуру поверхности.

## 5.2 ПОСТУПЛЕНИЯ ТЕПЛА И ВЛАГИ В ПОМЕЩЕНИЕ С ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ И С ВОДЯНЫМ ПАРОМ

Одним из основных факторов, влияющих на интенсивность процесса испарения воды, является подвижность воздуха над ее поверхностью. Поэтому в эмпирических расчетных зависимостях количества перенесенного тепла и влаги представлены в виде функции скорости движения воздуха.

С открытой поверхности нагретой воды тепло поступает в помещение в явном и скрытом виде. Явное тепло,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ , поступающее в помещение в результате лучисто-конвективного теплообмена, при известной скорости движения воздуха  $v_{\text{в}}$  над поверхностью и температуре поверхности воды  $t_{\text{пов}}$  приближенно определяется по формуле

$$q_{\text{в}}^{\text{я}} \approx (5,71 + 4,06 \cdot v_{\text{в}})(t_{\text{пов}} - t_{\text{в}})$$

Скрытое тепло,  $\text{кДж}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ , поступающее в помещение с водяными парами, равно:

$$q_{\text{скр}} = i_{\text{п}} I_{t_{\text{пов}}}$$

где  $i_{\text{п}}$  — интенсивность испарения па поверхности воды;  $I_{t_{\text{пов}}}$  — энтальпия пара,  $\text{кДж}/\text{кг}$ , соответствующая температуре поверхности воды, равная

$$I_{t_{\text{пов}}} = 2500 + 1,8 \cdot t_{\text{пов}}$$

При составлении теплового баланса помещения интенсивность испарения,  $\text{кг}/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$ , можно определить по приближенной формуле

$$i_{\text{п}} = (a + 0,131 \cdot v_{\text{в}})(p_{\text{пов}} - p_{\text{в}})$$

где  $a$  — коэффициент, зависящий от температуры поверхности воды  $t_{\text{пов}}$  ( $0,216 - 0,0383$  от  $30$  до  $90$   $^{\circ}\text{C}$ ) ;

$p_{\text{в}}$  и  $p_{\text{пов}}$  — упругость водяного пара соответственно в воздухе и при полном насыщении воздуха водяными парами при температуре поверхности воды,  $\text{кПа}$ .

Если нагретая вода не перемешивается и находится в резервуаре в спокойном состоянии, то температура ее поверхности  $t_{\text{пов}}$  ниже средней температуры толщи воды  $t_{\text{ж}}$ . При температуре воды до  $40^{\circ}\text{C}$  эта разница составляет около  $2^{\circ}\text{C}$ ; при температуре воды  $70\text{—}75^{\circ}\text{C}$  она максимальная и составляет около  $12\text{ C}$ ; по мере приближения к температуре кипения ( $100^{\circ}\text{C}$ ) разница температур вновь понижается до  $3^{\circ}\text{C}$ .

При кипении интенсивность испарения зависит от количества подводимого к воде тепла; ориентировочно она равна 40—50 кг/(ч·м<sup>2</sup>). При наличии укрытий (зонтов, крышек и т. д.), через которые пар частично прорывается в помещение, вводится понижающий коэффициент, значение которого определяется опытным путем.

Если теплообмен происходит при постепенном остывании воды, то полное количество отданного тепла, кДж/ч, при известной начальной  $t_{\text{нач}}$  и конечной  $t_{\text{кон}}$  температуре воды составляет

$$Q'_{\text{ж}} = G_{\text{ж}} \cdot c_{\text{ж}} (t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}})$$

Иным будет процесс теплообмена, если вода длительное время находится в условиях тепловлажностного равновесия с окружающим воздухом (например, на полу помещения). В этом случае происходит адиабатическое испарение воды. Температура воды оказывается ниже температуры воздуха и приблизительно равной температуре мокрого термометра:

$$t_{\text{ж}} \approx t_{\text{м}}$$



В результате разности температур явное тепло конвекцией и излучением передается от помещения к воде. В силу равновесного состояния это тепло расходуется на испарение воды и в виде энтальпии образовавшегося водяного пара поступает обратно в воздух помещения. В результате передачи воде конвективного тепла температура воздуха понижается, а общая энтальпия его остается практически неизменной благодаря увеличению влагосодержания и доли энтальпии поступившего в воздух водяного пара.

Фактически энтальпия воздуха несколько увеличивается, так как энтальпия водяного пара больше конвективной доли явного тепла, переданного воде, на величину лучистой составляющей теплообмена, а также в результате подвода тепла путем теплопроводности через поверхности, не соприкасающиеся с воздухом. Для испарения 1 кг влаги из помещения должно быть отдано  $2500 + 1,8 \cdot t_{\text{в}} - c_{\text{ж}} \cdot t_{\text{ж}}$ , кДж, явного тепла. Количество испаряющейся влаги, кг/(ч·м<sup>2</sup>), при адиабатическом процессе приближенно может быть определено по формуле

$$i_{\text{п}} = (6 \dots 6,5) 10^{-3} (t_{\text{в}} - t_{\text{м}})$$

Общее количество явного тепла, кДж/ч, отданного из помещения воде в этих условиях, равно:

$$Q'_{\text{ж}} = (2500 + 1,8 \cdot t_{\text{в}} - c_{\text{ж}} \cdot t_{\text{ж}}) \cdot i_{\text{п}} \cdot F$$

$F$  – площадь поверхности испарения

В производственных помещениях пар может подаваться по паропроводам и использоваться для механической работы (например, в паровых молотах). Энергия пара, израсходованная для выполнения механической работы, в конечном счете переходит в тепло и передается помещению. Количество явного тепла, кДж/ч, при этом определяют по формуле

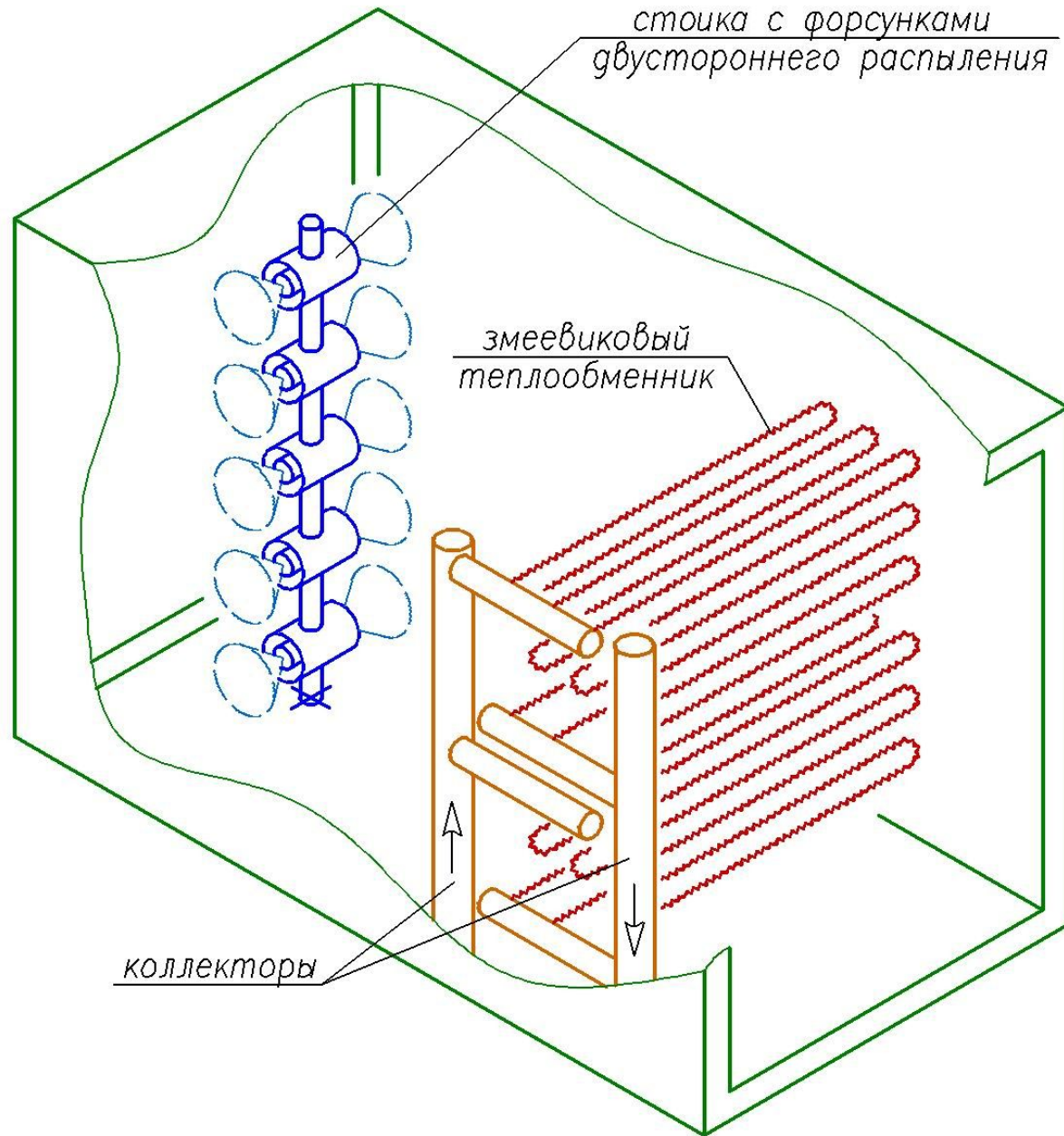
$$Q' = G_{\text{п}}(I_{\text{нач}} - I_{\text{кон}})$$

## 5.3 ТЕПЛО- И ВЛАГООБМЕН В АППАРАТАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА

Распространенными аппаратами для тепловлажностной обработки воздуха в установках кондиционирования являются форсуночные камеры, орошаемые насадки и другие устройства, позволяющие осуществлять изменения его параметров в широком диапазоне. В теплый период года можно охлаждать и осушать воздух, охлаждать его при неизменном влагосодержании, охлаждать и увлажнять его. В холодный период года используют адиабатическое увлажнение, а также контактный нагрев воздуха.

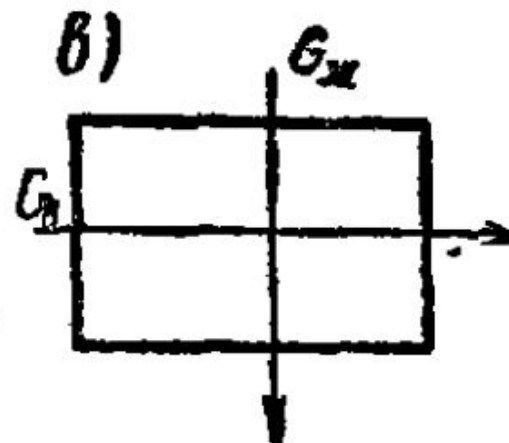
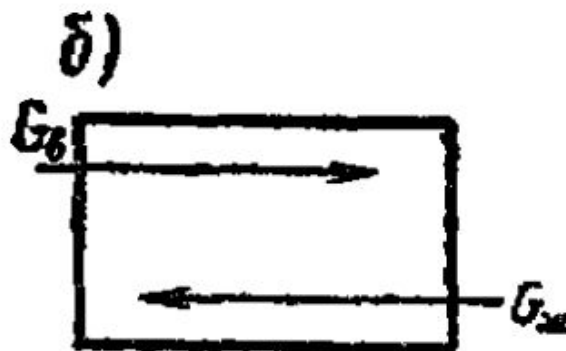
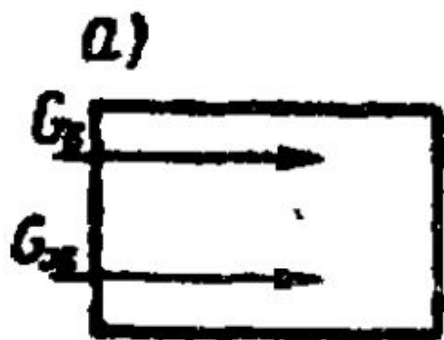
Постановка задачи расчета тепло- и влагообмена в аппаратах кондиционирования воздуха очень сложна и основывается на экспериментах.

направление  
воздушного потока



- Экспериментальные характеристики получены для различных аппаратов, в которых воздух специально готовится путем контакта с нагретой или охлажденной водой. В одних аппаратах вода разбрызгивается и воздух продувается через дождевое пространство с каплями различной дисперсности, в других она может стекать в виде пленок, образуя вспененный слой или гладкую свободную поверхность. Взаимное направление потоков воздуха и воды (см.рис.) и продолжительность их контакта между собой также могут быть различными.

а) параллельный ток; б) противоток;  
в) перекрестный ток.





# *6 ПОСТУПЛЕНИЕ В ВОЗДУХ ПОМЕЩЕНИЙ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ И ПЫЛИ.*

## *ВЗРЫВООПАСНОСТЬ ГАЗОВ И ПАРОВ*

### **6.1 КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СВОЙСТВ ВРЕДНЫХ ВЕЩЕСТВ И ПЫЛИ**

Понятие о токсичности выделяющихся в помещении газов и паров вредных веществ связано с их опасным действием на организм человека. Вредные для здоровья вещества носят название промышленных ядов; сюда же относится и токсичная пыль.

**Ядами** называют вещества, которые, попадая в организм человека в небольших количествах, приводят к заболеваниям и отравлениям. Отравления бывают острыми и хроническими. Острые отравления возникают в результате поступления в организм человека в течение короткого периода относительно больших количеств яда. Хронические отравления возникают в результате поступления в организм человека относительно небольших количеств яда в течение сравнительно длительного периода. В производственных условиях яды могут проникать в организм человека через органы дыхания, пищеварительный тракт и кожу.

**Газы и пары** вредных веществ делятся на две основные группы:

1 — химически не реагирующие газы и пары, которые не вступают в реакцию с клетками организма человека и не изменяются в нем;

2 — химически реагирующие газы и пары.

Токсичность вещества зависит от его химической структуры, физических свойств и агрегатного состояния.

Газы и пары вредных веществ выделяются в воздух производственных помещений при химических реакциях, испарении жидких растворов с открытых поверхностей, испарении летучей части лакокрасочных материалов с окрашенных поверхностей, прорыве через различные неплотности аппаратуры и коммуникационных трубопроводов, сжигании топлива, выхлопе газов от двигателей внутреннего сгорания автомобилей, отборе проб из химических аппаратов, загрузке и выгрузке материалов и в других случаях.

Газы и пары вредных веществ могут легко переноситься потоками перемещающегося по помещению воздуха от мест их выделения в места, где источники вредных выделений отсутствуют.

Содержание вредных веществ в воздухе производственных помещений на различных участках крайне неравномерно и зависит от мощности, мест и плотности расположения источников их выделения, от мест расположения приточных и вытяжных отверстий систем вентиляции и от характера циркуляции воздушных потоков в помещении. Газы и пары вредных веществ могут распространяться по помещению и вследствие диффузии.

**Пыль** выделяется в воздух производственных помещений в результате различных технологических процессов. Выделение пыли происходит в цехах предприятий текстильной, горнорудной, металлообрабатывающей, деревообрабатывающей, зерноперерабатывающей и других отраслей промышленности. При этом пыль может в больших количествах попадать в атмосферу, загрязняя воздушную среду.

По действию на организм человека различают ядовитую пыль (свинцовая, ртутная и пр.) и неядовитую (песчаная, асбестовая и пр.). Неядовитая пыль при длительном вдыхании может вызывать у человека различные легочные заболевания под названием пневмокониозы (силикоз, асбестоз и др.).

Пыли как органического, так и неорганического происхождения, образующиеся при размельчении горючих материалов, взрывоопасны вследствие очень развитой суммарной поверхности пылевых частиц по сравнению с поверхностью вещества, из которого они получены. К таким пылям относятся мучная, угольная, табачная, сахарная и др.

Взрывоопасность пыли зависит от размеров пылевых частиц. Например, очень взрывоопасна угольная пыль при размерах частиц 75 мкм. Та же угольная пыль при размерах частиц 10 мкм и менее имеет пониженную взрывоопасность благодаря быстрому окислению пылевых частиц и способности их свертываться в хлопья. Каждая взрывоопасная пыль имеет свои пределы взрывоопасных концентраций.

Некоторые пыли способны воспламеняться при температуре 205°C. Эти же пыли при концентрации 68 мг/м<sup>3</sup> и выше взрывоопасны.

Пыль, выделяющаяся в производственных помещениях, оказывает вредное воздействие не только на организм человека, но и на технологический процесс, часто ухудшая его и приводя к износу оборудования.

## 6.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА ГАЗОВ И ПАРОВ, ПОСТУПАЮЩИХ В ВОЗДУХ ПОМЕЩЕНИЙ

### Выделение углекислого газа $\text{CO}_2$ людьми.

Количество углекислого газа, выделяемого людьми, зависит от интенсивности выполняемой ими работы и может быть определено по табл.

Возраст людей и характер выполняемой работы	Объемный расход $\text{CO}_2$ , л/ч	Массовый расход $\text{CO}_2$ , г/ч
Взрослые люди при выполнении работы		
умственной (или в состоянии покоя)	23	45
легкой физической	30	60
тяжелой »	45	90
Дети до 12 лет	12	24

**Выделение газов и паров** при химических реакциях. Массу газов, выделяющихся при химических реакциях, следует определять на основании формул этих реакций. При этом необходимо учитывать, что в промышленности используются не химически чистые вещества, и поэтому в воздух помещения могут поступать и побочные продукты.



## **Выделение газов и паров со свободной поверхности жидкости.**

Массовый расход испаряющейся жидкости, содержащей химические вещества, может быть определен с достаточным приближением по формуле

$$G = M(0,000352 + 0,000786 v) p F$$

где  $G$  — массовый расход испаряющейся жидкости, кг/ч;  $M$  — относительная молекулярная масса испаряющейся жидкости;  $v$  — скорость перемещения воздуха над поверхностью жидкости, м/с;  $p$  — упругость пара жидкости, насыщающего воздух при температуре жидкости, мм рт. ст.;  $F$  — площадь поверхности испарения, м<sup>2</sup>.

Значения упругости пара  $p$  некоторых жидкостей, испаряющихся при температуре помещения, приведены в табл.

Жидкость	ρ, Па (мм. рт. ст.)	Жидкость	ρ, Па (мм. рт. ст.)
Этиловый эфир	5720 (43)	Амиловый спирт, хлор бензол	532(4)
Ацетон	3720 (28)	Анилин, нитробензол	40(0,3)
Этиловый спирт, бензол, дихлорэтан	2000 (15)	Ртуть	0,16(0,0012)

## Проникание газов и паров через неплотности.

Массовый расход газов и перегретых паров, просачивающихся через неплотности технологических аппаратов и трубопроводов, работающих под давлением, может быть определен по формуле (для адиабатического процесса)

$$G = KcV \sqrt{\frac{M}{T}}$$

где  $G$  — массовый расход просачивающихся газов, кг/ч;  $K$  — коэффициент запаса, характеризующий состояние оборудования ( $K=1 \dots 2$ );  $c$  — коэффициент, зависящий от давления газов или паров в аппаратуре;  $V$  — внутренний объем аппаратуры и трубопроводов, находящихся под давлением, м<sup>3</sup>;  $M$  — относительная молекулярная масса газов или паров в аппаратуре;  $T$  — абсолютная температура газов или паров в аппаратуре, К.

## Испарение различных растворителей и лаков.

Массовый расход паров растворителей, выделяющихся при окраске или лакировке, определяют по формуле

$$G = \frac{Am}{100} F$$

где  $G$  — массовый расход выделяющихся паров растворителей, г/ч;  $A$  — расход лакокрасочных материалов, г на  $1 \text{ м}^2$  площади поверхности изделия (60-200),  $m$  — содержание летучих растворителей в лакокрасочном материале, (35-90) %;  $F$  — площадь поверхности изделий, окрашиваемой или лакируемой за 1 ч,  $\text{м}^2$

## Газовыделения при сжигании топлива и работе двигателей.

Массовый расход газов, выделяющихся при сжигании топлива, определяют по формуле

$$G_{\Gamma} = G_{\text{T}} g_{\Gamma}$$

где  $G_{\Gamma}$  — массовый расход газов, выделяющихся при сжигании топлива, кг/ч;  $G_{\text{T}}$  — массовый расход сжигаемого топлива, кг/ч;  $g_{\Gamma}$  — масса продуктов сгорания в кг на 1 кг топлива.

## 6.3 ВЗРЫВООПАСНОСТЬ ГАЗОВ И ПАРОВ

Некоторые газы и пары в определенной смеси с воздухом взрывоопасны. Повышенной взрывоопасностью отличаются смеси воздуха с ацетиленом, этиленом, бензолом, метаном, окисью углерода, аммиаком, водородом.

Взрыв смеси может произойти только при определенных соотношениях горючих газов с воздухом или кислородом, характеризуемых нижним и верхним пределами взрываемости. **Нижним пределом взрываемости** называется то минимальное содержание газа или пара в воздухе, которое при воспламенении может привести к взрыву. **Верхний пределом взрываемости** называется то максимальное содержание газа или пара в воздухе, при котором в случае воспламенения еще может произойти взрыв.

Опасная зона взрываемости лежит между нижним и верхним пределами.

Концентрация газов или паров в воздухе производственных помещений ниже нижнего и выше верхнего предела взрываемости невзрывоопасна, так как при ней не происходит активного горения и взрыва — в первом случае из-за избытка воздуха, а во втором из-за его недостатка.

В табл. приведены нижние и верхние пределы взрываемости некоторых газов и паров.

Газы и пары	Нижние и верхние пределы взрываемости		Газы и пары	Нижние и верхние пределы взрываемости	
	по объему, %	по массе, мг/л		по объему, %	по массе, мг/л
<b>Аммиак</b>	<b>16 и 27</b>	<b>111,2 и 187,65</b>	<b>Метан</b>	<b>5,3 и 14</b>	<b>34,45 и 91</b>
<b>Ацетон</b>	<b>3 и 11</b>	<b>71,1 и 260,7</b>	<b>Окись углерода</b>	<b>112,5 и 74</b>	<b>142,5 и 843,6</b>
<b>Бензин</b>	<b>2,4 и 4,9</b>	<b>137 и 281</b>	<b>Этилацетат</b>	<b>2,25 и 11</b>	<b>82,4 и 403</b>
<b>Бензол</b>	<b>1,4 и 7</b>	<b>44,66 и 223,3</b>	<b>Этиловый спирт</b>	<b>4 и 19</b>	<b>75,2 и 357,2</b>
<b>Водород</b>	<b>4,1 и 74</b>	<b>3,362 и 60,68</b>			



Для определения предела взрываемости газоздушных смесей можно пользоваться формулой Ле-Шателье:

$$x_{\text{см}} = \frac{100}{\frac{n_1}{x_1} + \frac{n_2}{x_2} + \dots + \frac{n_n}{x_n}}$$

Где  $n_1, n_2, \dots, n_n$  — содержание отдельных газов в смеси, % (по объему);  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — пределы взрываемости соответствующих газов по объему, %.

Концентрация паров с точки зрения взрывобезопасности в помещениях производственных зданий не должна превышать 30% нижнего предела взрываемости.