

Министерство Российской Федерации  
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий

Академия Государственной противопожарной службы

**СБОРНИК ЗАДАЧ ПО КУРСУ  
«ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ»**

Допущено Министерством Российской Федерации  
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий в качестве  
учебного пособия для высших образовательных учреждений  
МЧС России

Москва  
2015

УДК 614.841.4(075.8)  
ББК 38.960.1я73  
С23

А в т о р ы:

С. А. Горячев, В. С. Клубань, Л. Т. Панасевич, А. П. Петров

Р е ц е н з е н т ы:

*А. Х. Салихова*, начальник научно-исследовательского отделения  
Учебно-научного комплекса «Государственный надзор»

кандидат технических наук;

*А. А. Бондарев*, начальник НТО ДНД МЧС России

**Сборник задач по курсу «Пожарная безопасность технологи-  
С23 ческих процессов»:** учеб. пособие / С. А. Горячев, В. С. Клубань,  
Л. Т. Панасевич и др.; под общ. ред. Л. Т. Панасевич. – М. : Акаде-  
мия ГПС МЧС России, 2015. – 175 с.

ISBN 978-5-9229-0090-4

Сборник задач написан в соответствии с программой курса и состоит из трех глав и двух приложений. В главе 1 рассмотрен анализ пожарной опасности и защиты технологического оборудования с пожаровзрывоопасными средами; в главе 2 рассмотрена методика определения параметров пожаровзрывоопасных зон, образующихся при реализации аварийных ситуаций на наружных технологических установках; в главе 3 приводятся технические решения, направленные на обеспечение пожарной безопасности технологических процессов.

Сборник задач предназначен для курсантов, студентов и слушателей образовательных учреждений МЧС России пожарно-технического профиля.

Параграфы 1.1, 1.2, 1.5 и 1.6 главы 1, глава 2 и параграфы 3.1, 3.2, 3.3, 3.7 главы 3 написаны канд. техн. наук, доц. С. А. Горячевым, параграфы 1.3 и 1.4 – канд. техн. наук, доц. В. С. Клубанем, параграфы 3.4, 3.5, 3.6 и приложения – доц. кафедры Л. Т. Панасевич, параграф 3.8 – проф., д-р техн. наук А. П. Петровым и доц. кафедры Л. Т. Панасевич.

УДК 614.841.4(075.8)  
ББК 38.960.1я73



9 785922 900904

© Академия Государственной противопожарной  
службы МЧС России, 2015

# Глава 1. Анализ пожарной опасности и защиты технологического оборудования с пожаровзрывоопасными средами

## 1.1. Оценка пожаровзрывоопасности среды внутри технологического оборудования и способы обеспечения пожарной безопасности

### Основные теоретические положения

Условия образования горючих смесей (взрывоопасных концентраций – ВОК) внутри производственных аппаратов зависят от пожаровзрывоопасных свойств и агрегатного состояния веществ и материалов, обращающихся в технологическом процессе, конструктивных особенностей и режимов работы оборудования [8].

1.1.1. Внутри аппаратов с горючими газами или перегретыми парами ВОК образуются в том случае, если в них попадает воздух или по условиям ведения технологического процесса подается окислитель (кислород, воздух, хлор и др.) и выполняется соотношение

$$\varphi_{\text{н}} \leq \varphi_{\text{р}} \leq \varphi_{\text{в}}, \quad (1.1.1)$$

где  $\varphi_{\text{р}}$  – рабочая (действительная) концентрация горючего вещества в смеси с окислителем, об. доли (% (об.) или кг/м<sup>3</sup>);

$\varphi_{\text{н}}$  и  $\varphi_{\text{в}}$  – соответственно, нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени горючего вещества в данном окислителе при рабочих параметрах процесса – температуре и давлении, об. доли (% (об.) или кг/м<sup>3</sup>).

Значения  $\varphi_{\text{н}}$  и  $\varphi_{\text{в}}$  при 25 °С и атмосферном давлении для горючих веществ в смеси с воздухом даны в табл. 1 прил. 1. Определить значения величин  $\varphi_{\text{н}}$  и  $\varphi_{\text{в}}$  при температуре среды, отличной от 25 °С, можно по формулам:

$$\varphi_{\text{н}t_{\text{р}}} = \varphi_{\text{н}25} \left( 1 - \frac{t_{\text{р}} - 25}{1250} \right); \quad (1.1.2)$$

$$\varphi_{\text{в}t_{\text{р}}} = \varphi_{\text{в}25} \left( 1 + \frac{t_{\text{р}} - 25}{800} \right), \quad (1.1.3)$$

где  $t_{\text{р}}$  – рабочая температура среды в аппарате, °С.

Рабочую концентрацию горючего газа в смеси с окислителем можно определить из материального баланса аппарата по формулам:

$$\varphi_p = \frac{V_{\Gamma}}{V_{\Gamma} + V_{\text{ок}}} \quad (1.1.4)$$

или

$$\varphi_p = \frac{G_{\Gamma}}{G_{\Gamma} + G_{\text{ок}}}, \quad (1.1.5)$$

где  $V_{\Gamma}$ ,  $V_{\text{ок}}$  – объемы, соответственно, горючего газа и окислителя в аппарате,  $\text{м}^3$ ;

$G_{\Gamma}$ ,  $G_{\text{ок}}$  – объемные расходы горючего газа и окислителя,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

Взрывобезопасные условия эксплуатации аппаратов с горючими газами и перегретыми парами определяются из выражений:

$$\varphi_{\text{р.н}}^{\text{без}} \leq 0,9 (\varphi_{\text{н}} - 0,0021) \quad (1.1.6)$$

или

$$\varphi_{\text{р.в}}^{\text{без}} \geq 1,1 (\varphi_{\text{в}} + 0,0042), \quad (1.1.7)$$

где  $\varphi_{\text{р.н}}^{\text{без}}$  и  $\varphi_{\text{р.в}}^{\text{без}}$  – взрывобезопасные концентрации горючего вещества в газопаровоздушных смесях по нижнему (индекс н) и по верхнему (индекс в) концентрационным пределам распространения пламени, об. доли.

1.1.2. В свободном пространстве герметичных и «дышащих» аппаратов с пожароопасными жидкостями ВОК образуются в том случае, если выполняется условие (1.1.1).

В аппаратах с длительно хранящимися пожароопасными жидкостями концентрация паров близка к насыщенной, т. е.  $\varphi_p \approx \varphi_s$ .

Концентрацию насыщенных паров  $\varphi_s$  при рабочей температуре жидкости следует определять по формуле

$$\varphi_s = \frac{p_s}{p_p}, \quad (1.1.8)$$

где  $p_p$  – рабочее давление паровоздушной смеси в аппарате (абсолютное давление в герметичном аппарате или барометрическое давление  $p_{\text{бар}}$  в «дышащем» аппарате), Па;

$p_s$  – давление насыщенного пара жидкости при рабочей температуре, Па; значения  $p_s$  для некоторых пожароопасных жидкостей приведены в табл. 2 прил. 1.

Величину  $p_s$ , Па, можно определить по уравнению Антуана:

$$p_s = 10^3 \cdot 10^{\left( A - \frac{B}{t_p + C_A} \right)}, \quad (1.1.9)$$

где  $A$ ,  $B$  и  $C_A$  – константы уравнения Антуана, зависящие от свойств жидкости, принимаемые по справочнику [11].

Для пересчета концентрации паров или газов, в том числе концентрационных пределов распространения пламени, из объемных долей в килограммы в кубическом метре используется формула

$$\varphi^* = \varphi \rho_t = \varphi \frac{M}{V_t}, \quad (1.1.10)$$

где  $\varphi^*$  – концентрация в кг/м<sup>3</sup>;

$\varphi$  – концентрация в об. долях;

$\rho_t$  – плотность газа (пара) при рабочих условиях, кг/м<sup>3</sup>;

$M$  – масса кмоля газа (пара), кг/кмоль;

$V_t$  – объем кмоля газа или пара (м<sup>3</sup>/кмоль) при рабочих условиях, определяемый по формуле

$$V_t = V_0 \frac{T_p p_0}{T_0 p_p}, \quad (1.1.11)$$

здесь  $V_0$  – объем кмоля газа (пара) при нормальных физических условиях,  $V_0 = 22,41$  м<sup>3</sup>/кмоль,  $p_0 = 101325$  Па;  $T_0 = 273,15$  К ( $t_0 = 0$  °С). В инженерных расчетах можно принимать  $p_0 \approx 1 \cdot 10^5$  Па и  $T_0 \approx 273$  К.

Взрывобезопасные условия эксплуатации герметичного аппарата с пожароопасной жидкостью следует определять из выражений (1.1.6) и (1.1.7).

Взрывобезопасность среды в «дышащем» аппарате определяется только из выражения (1.1.6), так как в процессе его эксплуатации при снижении уровня жидкости или температуры окружающей среды в аппарат через дыхательное устройство поступает воздух, происходит разбавление «богатой» смеси с  $\varphi_p > \varphi_v$  и образование ВОК.

1.1.3. Если концентрация паров в свободном пространстве аппарата с пожароопасной жидкостью является насыщенной и остается неизменной во время его эксплуатации, то условие образования ВОК записывается следующим образом:

$$t_{н.п} \leq t_p \leq t_{в.п}, \quad (1.1.12)$$

где  $t_{н.п}$  и  $t_{в.п}$  – соответственно, нижний и верхний температурные пределы распространения пламени, °С (табл. 1 прил. 1).

Взрывоопасные температурные условия эксплуатации аппарата в этом случае определяют из выражений:

$$t_{п.н}^{без} \leq \frac{B}{A - \lg[0,9 \cdot 10^{-3}(\varphi_{н} - 0,0021) p_0]} - C_A \quad (1.1.13)$$

или

$$t_{п.в}^{без} \geq \frac{B}{A - \lg[1,1 \cdot 10^{-3}(\varphi_{в} + 0,0042) p_0]} - C_A. \quad (1.1.14)$$

1.1.4. При эксплуатации аппаратов с открытой поверхностью испарения (окрасочные, закалочные, пропиточные ванны, емкости для промывки деталей и тому подобные аппараты) ВОК паров над поверхностью испарения пожароопасной жидкости образуются при выполнении условия:

$$t_p \geq t_{\text{всп (о.т)}}, \quad (1.1.15)$$

где  $t_{\text{всп (о.т)}}$  – температура вспышки пожароопасной жидкости в открытом тигле, °С (табл. 1 прил. 1).

Взрывобезопасные условия эксплуатации открытого аппарата определяют из выражения

$$t_p^{\text{без}} \leq t_{\text{всп (о.т)}} - \Delta t_{\text{б.в}}, \quad (1.1.16)$$

где  $\Delta t_{\text{б.в}}$  – запас надежности к температуре вспышки,  $\Delta t_{\text{б.в}} = 35$  °С.

1.1.5. Концентрационные пределы распространения пламени смесей горючих газов и паров с негорючими компонентами оценивают по формуле

$$\varphi_{\text{пр.см}} = \frac{\sum_{i=1}^n \varphi_i}{\sum_{i=1}^n \frac{\varphi_i}{\varphi_{\text{пр}i}}}, \quad (1.1.17)$$

где  $\varphi_{\text{пр.см}}$  – концентрационный предел распространения пламени (нижний или верхний) смеси, об. доли;

$\varphi_i$  – объемная доля  $i$ -го горючего компонента в смеси;

$\varphi_{\text{пр}i}$  – концентрационный предел распространения пламени (нижний или верхний)  $i$ -го компонента, об. доли;

$n$  – количество горючих компонентов в смеси.

Когда смесь газов (паров) состоит только из горючих компонентов, в числителе формулы (1.1.17) следует принимать

$$\sum_{i=1}^n \varphi_i = 1.$$

Температурные пределы распространения пламени пожароопасных жидкостей можно пересчитать в концентрационные (или наоборот) по формуле

$$t_{\text{пр}} = \frac{B}{A - \lg(10^{-3} \varphi_{\text{пр}} p_0)} - C_A, \quad (1.1.18)$$

где  $t_{\text{пр}}$  – температурный предел распространения пламени (нижний или верхний) при атмосферном давлении, °С.

Значения температурных пределов распространения пламени пожароопасных жидкостей при рабочем давлении  $p_p$ , отличном от атмосферного, в интервале от  $0,1 \cdot 10^5$  до  $2 \cdot 10^5$  Па пересчитывают по формуле

$$t_{\text{н.п.р}} = \frac{B}{\frac{B}{C_A + t_{\text{н.п.р}}} \pm \lg(10^{-5} p_p)} - C_A. \quad (1.1.19)$$

Знак «+» перед логарифмом ставится при расчете  $t_{\text{н.п.р}}$ , а знак «-» – при расчете  $t_{\text{в.п.р}}$ .

Аналогично можно пересчитать температуру вспышки жидкости (перед логарифмом ставится знак «+»).

1.1.6. В аппаратах обычно находятся не индивидуальные пожароопасные жидкости, а их смеси, часто называемые *растворами*. Давление насыщенных паров компонентов над смесью неограниченно растворимых друг в друге жидкостей определяют по закону Рауля (для идеальных растворов):

$$p'_{si} = p_{si} x_i, \quad (1.1.20)$$

где  $p'_{si}$  – парциальное давление  $i$ -го компонента над раствором, Па;

$p_{si}$  – давление насыщенного пара чистого  $i$ -го компонента при данной температуре, Па;

$x_i$  – мольная доля  $i$ -го компонента в растворе.

Содержание компонентов в растворе определяют по формулам:

$$\varphi_i = \frac{V_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad (1.1.21)$$

или

$$C_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, \quad (1.1.22)$$

где  $\varphi_i$  и  $C_i$  – соответственно, объемная и массовая доля  $i$ -го компонента в растворе;

$V_i$  – объем  $i$ -го компонента в растворе, м<sup>3</sup>;

$m_i$  – масса  $i$ -го компонента в растворе, кг;

$n$  – число компонентов в растворе.

Пересчет относительного объемного или массового содержания компонентов в растворе в мольные доли компонентов для бинарных растворов, содержащих компоненты  $a$  и  $b$ , производят по формулам:

$$C_a = \frac{\varphi_a \rho_a}{\varphi_a \rho_a + (1 - \varphi_a) \rho_b}; \quad (1.1.23)$$

$$x_a = \frac{\frac{C_a}{M_a}}{\frac{C_a}{M_a} + \frac{1 - C_a}{M_b}}, \quad (1.1.24)$$

где  $\varphi_a$  и  $\varphi_b$  – объемные доли, соответственно, компонентов  $a$  и  $b$  в бинарном растворе ( $\varphi_b = 1 - \varphi_a$ );

$\rho_a$  и  $\rho_b$  – плотности чистых компонентов, соответственно,  $a$  и  $b$ , кг/м<sup>3</sup> (табл. 4 прил. 1);

$C_a$  и  $C_b$  – массовые доли компонентов  $a$  и  $b$  в растворе ( $C_b = 1 - C_a$ );

$M_a$  и  $M_b$  – молекулярные массы чистых компонентов, соответственно,  $a$  и  $b$ , кг/кмоль;

$x_a$  и  $x_b$  – мольные доли компонентов  $a$  и  $b$  в растворе ( $x_b = 1 - x_a$ ).

Формулы для перевода массовых долей компонентов в газовых смесях в объемные доли, а также для определения плотности, молекулярной массы и удельной газовой постоянной смеси паров или газов приведены в табл. 3 прил. 1.

1.1.7. В процессах переработки, транспортировки кусковых или измельченных твердых горючих материалов, а также при их обработке образование взрывоопасных пылевоздушных смесей происходит при выполнении соотношения

$$\varphi_p \geq \varphi_n, \quad (1.1.25)$$

где  $\varphi_p$  – фактическая (рабочая) концентрация пыли в аппарате или помещении с учетом наличия взвешенной и осевшей пыли, кг/м<sup>3</sup>;

$\varphi_n$  – нижний концентрационный предел распространения пламени пыли, кг/м<sup>3</sup>.

Действительную концентрацию пыли в аппарате можно вычислить по формуле

$$\varphi_p = \varphi_{вз} + \varphi_{ос}, \quad (1.1.26)$$

где  $\varphi_{вз}$  – концентрация взвешенной горючей пыли в аппарате, кг/м<sup>3</sup>;

$\varphi_{ос}$  – концентрация осевшей горючей пыли в аппарате, которая может перейти во взвешенное состояние, кг/м<sup>3</sup>:

$$\varphi_{ос} = \frac{I_{отл} \tau}{V_{св}} \quad \text{или} \quad \varphi_{ос} = \frac{m_{ос}}{V_{св}}, \quad (1.1.27)$$



где  $I_{отл}$  – интенсивность образования отложений пыли, кг/с;

$\tau$  – продолжительность работы аппарата, с;

$V_{св}$  – свободный объем аппарата, м<sup>3</sup>;

$m_{ос}$  – масса осевшей пыли в аппарате, кг.

Взрывобезопасные условия эксплуатации аппарата с горючей пылью определяют из выражения

$$\varphi_p^{без} \leq \frac{\varphi_H}{K_{б.н}}, \quad (1.1.28)$$

где  $K_{б.н}$  – коэффициент безопасности (запаса надежности) к нижнему концентрационному пределу распространения пламени,  $K_{б.н} \geq 2$ .

1.1.8. Для флегматизации горючих газопаровоздушных смесей в производственных аппаратах применяют инертные газы: диоксид углерода  $CO_2$ , азот, водяной пар (при температуре среды в аппарате выше 100 °С), аргон и др.

Предельно допустимую взрывобезопасную концентрацию флегматизатора (ПДВК<sub>ф</sub>) вычисляют по формуле

$$ПДВК_{ф} = K_{б.ф} \varphi_{ф}, \quad (1.1.29)$$

где  $K_{б.ф}$  – коэффициент запаса надежности, принимаемый следующим образом:

– при  $\varphi_{ф} > 0,15$  об. долей  $K_{б.ф} \geq 1,2$ ;

– при  $\varphi_{ф} \leq 0,15$  об. долей  $K_{б.ф} \geq 1,5$ ;

$\varphi_{ф}$  – минимальная флегматизирующая концентрация инертного газа, об. доли; величина  $\varphi_{ф}$  для некоторых индивидуальных веществ приводится в справочнике [11]; величину  $\varphi_{ф}$  можно также определить расчетом:

$$\varphi_{ф} = 1 - 4,77 \varphi_{\phi O_2}, \quad (1.1.30)$$

где  $\varphi_{\phi O_2}$  – минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК), величина которого принимается по справочнику [11] или оценивается расчетом (при флегматизации среды азотом) по формуле

$$\varphi_{\phi O_2} = \beta \varphi_H, \quad (1.1.31)$$

где  $\beta$  – стехиометрический коэффициент при кислороде в уравнении сгорания 1 моля горючего вещества.

Определить значение минимальной флегматизирующей концентрации при температуре среды, отличной от 25 °С, можно по формуле

$$\varphi_{\phi p} = \varphi_{\phi 25} \left( 1 + \frac{t_p - 25}{1100} \right). \quad (1.1.32)$$

Количество инертного газа, необходимое для флегматизации горючей смеси в аппарате, определяют из выражения

$$V_{\phi} = V_{\text{св}} \text{ПДВК}_{\phi}, \quad (1.1.33)$$

где  $V_{\phi}$  – количество инертного газа, необходимое для флегматизации среды в аппарате, м<sup>3</sup>.

### Примеры

**Пример 1.1.1.** Нижний и верхний концентрационный предел распространения пламени метилового спирта при 25 °С, соответственно, равны 0,0698 и 0,355 об. долям (табл. 1 прил. 1). Определить эти показатели для спиртовоздушной смеси, нагретой до 350 °С.

**Решение.** Нижний концентрационный предел распространения пламени метанола при данной температуре определяем по формуле (1.1.2):

$$\varphi_{\text{н}} = 0,0698 \left( 1 - \frac{350 - 25}{1250} \right) = 0,052 \text{ об. долей.}$$

Верхний концентрационный предел распространения пламени метанола при 350 °С определяем по формуле (1.1.3):

$$\varphi_{\text{в}} = 0,355 \left( 1 + \frac{350 - 25}{800} \right) = 0,499 \text{ об. долей.}$$

Таким образом, для метанола-воздушной смеси, нагретой до 350 °С, НКПР = 0,052 об. долей и ВКПР = 0,499 об. долей.

**Пример 1.1.2.** Исходя из условий взрывобезопасного ведения технологического процесса, определить расход окислителя (кислорода), подаваемого в аппарат для приготовления реакционной смеси с н-Бутаном. Производительность смесителя составляет 0,5 м<sup>3</sup>/с по бутану. Давление в смесителе близко к атмосферному, температура процесса 25 °С.

**Решение.** Взрывобезопасные концентрации н-Бутана при эксплуатации смесителя определяем по формулам (1.1.6) и (1.1.7):

$$\varphi_{\text{р.н}}^{\text{без}} \leq 0,9 (0,018 - 0,0021) = 0,014 \text{ об. долей}$$

или

$$\varphi_{\text{р.в}}^{\text{без}} \geq 1,1 (0,49 + 0,0042) = 0,534 \text{ об. долей,}$$

здесь 0,018 и 0,49 об. долей – соответственно, нижний и верхний концентрационные пределы распространения пламени н-Бутана в смеси с кислородом [11].

Преобразуем выражение (1.1.5) в соответствии с условиями задачи, когда  $\varphi_p = \varphi_p^{\text{без}}$ :

$$G_{\text{ок}} = G_{\Gamma} (1 - \varphi_p^{\text{без}}) / \varphi_p^{\text{без}}.$$

По условию  $G_{\Gamma} = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Тогда  $G_{\text{ок}} = 0,5 (1 - \varphi_p^{\text{без}}) / \varphi_p^{\text{без}}$ .

Подставляем найденные взрывобезопасные значения рабочих концентраций н-Бутана в полученное выражение и определяем безопасные значения расхода кислорода:

$$G_{\text{ок}}^{\text{без}} > 0,5 (1 - 0,014) / 0,014 = 35,21 \text{ м}^3/\text{с}$$

или

$$G_{\text{ок}}^{\text{без}} < 0,5 (1 - 0,534) / 0,534 = 0,44 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Взрывобезопасность технологического процесса (при заданной постоянной производительности смесителя по бутану) обеспечивается при выполнении следующих условий:

1) расход окислителя (кислорода) должен превышать  $35,21 \text{ м}^3/\text{с}$

или

2) расход кислорода должен быть менее  $0,44 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Пример 1.1.3. Пересчитать значение нижнего концентрационного предела распространения пламени толуола из об. долей в  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Рабочее давление паровоздушной смеси в аппарате атмосферное, температура  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Решение. По табл. 1 прил. 1 находим для толуола  $\varphi_{\text{н}} = 0,0127$  об. долей,  $M_{\Gamma} = 92,14 \text{ кг}/\text{кмоль}$ .

Молярный объем пара при рабочих условиях определяем по формуле (1.1.11):

$$V_{30} = 22,41 \frac{30 + 273}{273} = 24,87 \text{ м}^3/\text{кмоль}.$$

Нижний концентрационный предел распространения пламени толуола определяем по формуле (1.1.10):

$$\varphi^* = \frac{92,14 \cdot 0,0127}{24,87} = 0,047 \text{ кг}/\text{м}^3 \text{ или } 47 \text{ г}/\text{м}^3.$$

Пример 1.1.4. Определить концентрацию насыщенного пара над раствором этилового спирта в бензоле при  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении в аппарате. На приготовление раствора израсходовано  $50 \text{ л}$  этилового спирта и  $120 \text{ л}$  бензола.

Решение. Относительное объемное содержание компонентов в растворе определяем по формуле (1.1.21):

– этиловый спирт:  $\varphi_3 = \frac{50}{50 + 120} = 0,294$  об. долей;

– бензол:  $\varphi_6 = 1 - 0,294 = 0,706$  об. долей.

По табл. 4 прил. 1 находим плотности компонентов раствора при рабочей температуре:

$$\rho_3 = 772,2 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_6 = 857,6 \text{ кг/м}^3.$$

Относительное массовое содержание компонентов в растворе определяем по формуле (1.1.23):

$$C_3 = \frac{0,294 \cdot 772,2}{0,294 \cdot 772,2 + 0,706 \cdot 857,6} = 0,273 \text{ масс. долей};$$

$$C_6 = 1 - 0,273 = 0,727 \text{ масс. долей}.$$

Мольную долю компонентов в растворе определяем по формуле (1.1.24):

$$x_3 = \frac{0,273 / 46,07}{0,273 / 46,07 + 0,727 / 78,11} = 0,389 \text{ долей моля};$$

$$x_6 = 1 - 0,389 = 0,611 \text{ долей моля},$$

здесь 46,07 кг/кмоль и 78,11 кг/кмоль – молекулярные массы, соответственно, этилового спирта и бензола (табл. 1 прил. 1).

Давление насыщенных паров чистых компонентов при 40 °С (313 К) определяем по табл. 2 прил. 1.

Этиловый спирт:

$$\text{– при } T = 308,0 \text{ К } p_s = 13\,332,2 \text{ Па};$$

$$\text{– при } T = 321,6 \text{ К } p_s = 26\,664,4 \text{ Па}.$$

Следовательно, при  $T = 313 \text{ К}$

$$p_{s3} = 13332,2 + (313 - 308) \frac{26664,4 - 13332,2}{321,6 - 308} = 18233,74 \text{ Па}.$$

Бензол:

$$\text{– при } T = 299,8 \text{ К } p_s = 13\,332,2 \text{ Па};$$

$$\text{– при } T = 315,4 \text{ К } p_s = 26\,664,4 \text{ Па}.$$

Следовательно, при  $T = 313 \text{ К}$

$$p_{s6} = 13332,2 + (313 - 299,8) \frac{26664,4 - 13332,2}{315,4 - 299,8} = 24613,29 \text{ Па}.$$

Парциальное давление паров компонентов над раствором определяем по формуле (1.1.20):

$$p'_{сэ} = 18233,74 \cdot 0,389 = 7089,07 \text{ Па};$$

$$p'_{сб} = 24613,29 \cdot 0,611 = 15043,92 \text{ Па}.$$

Суммарное давление насыщенного пара над раствором:

$$p_s = 70989,07 + 15043,92 = 22132,99 \text{ Па}.$$

Концентрацию насыщенного пара над раствором этилового спирта в бензоле определяем по формуле (1.1.8):

$$\varphi_s = \frac{22132,99}{101325} = 0,2184 \text{ об. долей или } 21,84 \% \text{ (об.)}.$$

Пример 1.1.5. Показать, что внутри мерника с этилацетатом при 20 °С образуется горючая паровоздушная смесь (мерник – периодически действующий аппарат, оборудованный дыхательным патрубком).

Решение. По табл. 1 прил. 1 находим температурные пределы распространения пламени этилацетата:

$$t_{н.п} = -6 \text{ °С}, t_{в.п} = 28 \text{ °С}.$$

Подставляем численные значения величин в выражение (1.1.12):

$$(t_{н.п} = -6 \text{ °С}) < (t_p = 20 \text{ °С}) < (t_{в.п} = 28 \text{ °С}).$$

Видно, что условие образования ВОК (1.1.12) выполняется. Следовательно, в паровоздушном пространстве мерника при 20 °С образуется горючая смесь пара этилацетата с воздухом.

Пример 1.1.6. Определить нижний температурный предел распространения пламени этиленгликоля при атмосферном давлении (принять  $p_{бар} = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ).

Решение. По справочнику [11] находим константы уравнения Антуана (1.1.9) и значение нижнего концентрационного предела распространения пламени:

$$A = 8,13754; B = 2753,183; C_A = 252,009;$$

$$\varphi_n = 0,043 \text{ об. долей}.$$

Нижний температурный предел распространения пламени этиленгликоля определяем по формуле (1.1.18):

$$t_{н.п} = \frac{2753,183}{8,13754 - \lg(10^{-3} \cdot 0,043 \cdot 1 \cdot 10^5)} - 252,009 = 114,9 \text{ °С}.$$

Пример 1.1.7. Определить верхний концентрационный предел распространения пламени бытового (топливного) газа, имеющего следующий состав (средний), % (об.):

метан – 74,2; этан – 15,1; пропан – 8,5; бутаны – 0,6; азот – остальное.

Решение. По табл. 1 прил. 1 находим значения верхних концентрационных пределов распространения пламени компонентов газа, об. доли:

$$\varphi_{\text{в.метан}} = 0,141; \varphi_{\text{в.этан}} = 0,15; \varphi_{\text{в.пропан}} = 0,094; \varphi_{\text{в.бутан}} = 0,091.$$

Верхний концентрационный предел распространения пламени бытового газа определяем по формуле (1.1.17):

$$\varphi_{\text{в.см}} = \frac{0,742 + 0,151 + 0,085 + 0,006}{\frac{0,742}{0,141} + \frac{0,151}{0,15} + \frac{0,085}{0,094} + \frac{0,006}{0,091}} = 0,136 \text{ об. долей или } 13,6 \% \text{ (об.).}$$

Пример 1.1.8. Какое минимальное количество осевшей пыли полипропилена должно скопиться в циклоне, чтобы при ее взвихрении могла образоваться горючая пылевоздушная смесь во всем объеме аппарата? Объем циклона  $1,2 \text{ м}^3$ .

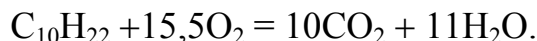
Решение. Нижний концентрационный предел распространения пламени пыли полипропилена равен  $40 \text{ г/м}^3$  [11].

Используя выражение (1.1.27), определяем массу осевшей в циклоне пыли в случае, когда  $\varphi_{\text{ос}} = \varphi_{\text{н}}$ :

$$m_{\text{ос}} = \varphi_{\text{н}} V_{\text{св}} = 40 \cdot 1,2 = 48 \text{ г.}$$

Пример 1.1.9. Определить минимальное взрывоопасное содержание кислорода в паровоздушной смеси, разбавленной азотом. Горючее вещество н-Декан.

Решение. Составляем уравнение сгорания 1 моля н-Декана:



Стехиометрический коэффициент при кислороде  $\beta = 15,5$ .

Определяем минимальное взрывоопасное содержание кислорода по формуле (1.1.31):

$$\varphi_{\text{фO}_2} = 15,5 \cdot 0,007 = 0,1085 \text{ об. долей или } 10,85 \% \text{ (об.).}$$

## Задачи

1.1.1. По условиям ведения технологического процесса в смеситель поступают горючий газ и воздух. Вид горючего газа, расходы компонентов  $G_{\text{г}}$  и  $G_{\text{ок}}$  и температура образующейся смеси  $t_{\text{р}}$  приведены в табл. 1.1.1.

Дать заключение о горючести газовой смеси в аппарате при условии, что давление в системе не меняется и близко к атмосферному.

Таблица 1.1.1

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Горючий газ	Ацетилен	Аммиак	н-Бутан	Водород	Метан	Оксид углерода СО	Пропан	Сероводород	Этан	Этилен
$G_r, \text{ м}^3/\text{ч}$	200	400	300	80	350	550	150	300	200	200
$G_{ок}, \text{ м}^3/\text{ч}$	8000	1200	3000	2000	7000	4000	1200	370	1200	400
$t_p, \text{ }^\circ\text{C}$	140	290	190	200	250	330	250	180	300	280

1.1.2. Предложить взрывобезопасный концентрационный режим эксплуатации газового смесителя (исходные данные приведены в табл. 1.1.1) с учетом того, что температура в аппарате изменяется от 25 °С (пуск аппарата в работу) до  $t_p$ .

1.1.3. Технологический процесс осветления продукта (пожароопасной жидкости) проводится в отстойнике, оборудованном дыхательным патрубком, при повышенной температуре.

Дать заключение о горючести паровоздушной смеси в отстойнике, если известно, что уровень продукта в нем периодически меняется. Рекомендовать взрывобезопасный температурный режим проведения процесса фильтрации.

Вид продукта и его температура приведены в табл. 1.1.2.

Таблица 1.1.2

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Продукт	Бутилацетат	н-Бутиловый спирт	Хлорбензол	Уксусная кислота	Бутилацетат	н-Бутиловый спирт	н-Ундекан	Уксусная кислота	Хлорбензол	н-Ундекан
Рабочая температура, °С	30	37	44	40	23	47	64	39	35	68

*Примечание.* При решении задачи необходимо учесть разбавление насыщенной паровоздушной смеси воздухом, который поступает в отстойник при снижении в нем уровня продукта.

1.1.4. Процесс фильтрации готового продукта (пожароопасной жидкости) проводят в герметичном фильтре, имеющем паровоздушное пространство.

Дать заключение о горючести паровоздушной смеси в аппарате при рабочих параметрах процесса и предложить мероприятия, направленные на предотвращение образования ВОК.

Вид продукта, рабочую температуру и давление среды в аппарате принять по табл. 1.1.3.

Таблица 1.1.3

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Продукт	н-Бутиловый спирт	н-Нонан	Бутилацетат	Этилбензол	н-Нонан	Стирол	Уксусная кислота	Этилбензол	Этилцеллозольв	Бутилацетат
Рабочая температура, °С	27	25	21	19	28	26	27	19	29	20
Рабочее давление, кПа	170	145	110	115	135	130	175	130	180	130

1.1.5. В процессе приготовления лакокрасочных материалов используется растворитель, состоящий из двух компонентов.

Дать заключение о возможности образования ВОК в сборнике с длительно хранящимся в нем растворителем при постоянной температуре. Давление в сборнике атмосферное, так как он оборудован дыхательным патрубком. Содержание компонентов растворителя в емкости и технологические параметры процесса хранения приведены в табл. 1.1.4.

Таблица 1.1.4

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Продукт	Бензол 400 л Толуол 600 л	Бензол 100 л Толуол 900 л	Толуол 800 л Ацетон 200 л	Толуол 700 л Ацетон 300 л	Ацетон 200 л Пропанол 800 л	Ацетон 250 л Пропанол 750 л	Толуол 450 л Этанол 550 л	Толуол 600 л Этанол 400 л	Бензол 200 л Пропанол 800 л	Бензол 200 л Пропанол 800 л
Температура, °С	20	30	20	10	20	30	20	30	30	20

1.1.6. На станции технического обслуживания автомобилей промывку деталей двигателей (перед сборкой) производят моющим средством (пожароопасной жидкостью) в открытом аппарате.

Дать рекомендации по снижению пожаровзрывоопасности данной технологической операции. Вид моющего средства и его максимальную температуру в аппарате принять по табл. 1.1.5.

Таблица 1.1.5

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Моющее средство	н-Пентадекан	н-Додекан	н-Тетрадекан	н-Ундекан	н-Тридекан	Керосин КО-22	Дизельное топливо «Л»	Уайт-спирит	н-Нонан	н-Гексатесан
Температура, °С	120	80	105	70	95	60	70	50	35	130



1.1.7. В процессе измельчения горючего кускового материала выделяется пыль, которая удаляется из внутреннего пространства дробилок местными отсосами. Концентрация пыли в отсасываемом воздухе достигает 1 % от нижнего концентрационного предела распространения пламени.

Дать заключение о возможности образования горючей пылевоздушной смеси в коллекторе воздуховода системы аспирации при взвихрении осевшей пыли через 24 ч после начала эксплуатации системы. Определить продолжительность взрывобезопасной эксплуатации системы аспирации, приняв  $K_{б.н} = 2$ . Другие данные для расчета приведены в табл. 1.1.6.

Таблица 1.1.6

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Твердый горючий материал	Донецкий уголь		Серный колчедан		Подмосковный уголь		Сера		Канифоль	
Объем коллектора, м <sup>3</sup>	35	70	100	250	40	80	400	600	150	80
Интенсивность образования отложений пыли, г/с	0,08	0,05	0,03	0,04	0,05	0,03	0,01	0,005	0,01	0,01
НКПР пыли, г/м <sup>3</sup> [11]	280		50,1		114		2,3		12,5	

*Примечание.* Для определения продолжительности безопасной эксплуатации системы аспирации необходимо решить выражения (1.1.26) и (1.1.28).

1.1.8. На производстве расходная емкость с горючей жидкостью подключена к системе азотного дыхания. Концентрация азота в системе колеблется в пределах 55–65 % (об.) (остальное – воздух и пары жидкости).

Оценить возможность образования ВОК в емкости, обосновать расчетом взрывобезопасную концентрацию инертного газа (азота) и определить его количество, необходимое для флегматизации среды в емкости. Давление в системе близко к атмосферному. Вид пожароопасной жидкости, температура среды в аппарате и его объем приведены в табл. 1.1.7.

Таблица 1.1.7

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Пожароопасная жидкость	н-Октан	н-Додекан	н-Ксилол	Бутилацетат	н-Декан	Стирол	Толуол	н-Ундекан	Хлорбензол	Этилбензол
Температура, °С	40	85	50	55	60	45	30	70	35	30
Объем аппарата, м <sup>3</sup>	5,8	4,5	6,0	7,5	9,2	8,0	6,8	5,2	4,7	3,9

## 1.2. Оценка пожаровзрывоопасности среды снаружи нормально работающего технологического оборудования и способы обеспечения пожарной безопасности

### Основные теоретические положения

Из нормально работающих аппаратов, оборудованных дыхательными устройствами, из аппаратов с открытой поверхностью испарения, из периодически действующих аппаратов, а также из аппаратов, работающих под повышенным давлением, горючие вещества выходят наружу в количествах, которые способны образовать не только локальные, но и общеобъемные взрывоопасные смеси в производственных помещениях. При установке аппаратов на открытых площадках вблизи мест выхода горючих газов, паров и пыли могут образоваться зоны ВОК [8]. Необходимым признаком образования ВОК вблизи таких аппаратов является выполнение условия (1.1.15) – для пожароопасных жидкостей или условия (1.1.25) – для всех классов горючих веществ: газов, жидкостей, пылей или волокон.

1.2.1. Интенсивность утечек паров и газов из работающего под давлением герметичного оборудования через капиллярные каналы в прокладках, сальниках, сварных швах и других местах на аппаратах и трубопроводах определяют по формуле

$$I_p = K_{и} K_p V_{св} \sqrt{\frac{M}{t_p + 273}}, \quad (1.2.1)$$

где  $I_p$  – интенсивность выхода газа или пара из аппарата, работающего под давлением, кг/с;

$K_{и}$  – коэффициент, учитывающий степень износа оборудования;  $K_{и}$  изменяется в пределах от 1 (новое оборудование) до 2 (изношенное оборудование);

$K_p$  – коэффициент, зависящий от давления среды в аппарате; значения  $K_p$  приведены в табл. 6 прил. 1;

$V_{св}$  – свободный объем оборудования, заполненный газом или паром под давлением, м<sup>3</sup>.

1.2.2. Массу выделяющихся из герметичного оборудования газов или паров за определенный период работы  $m_p$ , кг, определяют по формуле

$$m_p = I_p \tau, \quad (1.2.2)$$

где  $\tau$  – продолжительность работы оборудования, с.

1.2.3. Массу паров жидкости  $m_{п}$ , кг/цикл, выходящих из оборудованного дыхательным устройством аппарата за один цикл «дыхания», определяют по формуле

$$m_{п} = \left[ \frac{p_1 V_1}{273 + t_1} (1 - \varphi_{п_1}) - \frac{p_2 V_2}{273 + t_2} (1 - \varphi_{п_2}) \right] \frac{\bar{\varphi}_{п}}{1 - \bar{\varphi}_{п}} \frac{M_{п}}{R_{\mu}}, \quad (1.2.3)$$

где  $V_1$  и  $V_2$  – объем паровоздушного пространства, соответственно, в начале и в конце «дыхания», м<sup>3</sup>;

$\varphi_{п_1}$  и  $\varphi_{п_2}$  – концентрация насыщенного пара жидкости при температуре паровоздушной смеси, соответственно,  $t_1$  и  $t_2$ , об. доли;

$p_1$  и  $p_2$  – давление среды в аппарате, соответственно, в начале и в конце «дыхания», Па;

$\bar{\varphi}_{п}$  – средняя концентрация насыщенного пара, об. доли,  $\bar{\varphi}_{п} = (\varphi_{п_1} + \varphi_{п_2})/2$ ;

$R_{\mu}$  – универсальная газовая постоянная,  $R_{\mu} = 8314,31$  Дж/(кмоль·К).

1.2.4. Массу паров жидкости  $m_{п.б}$ , кг/цикл, выходящих из сообщающегося с атмосферой аппарата за один цикл «большого дыхания», определяют из выражения

$$m_{п.б} = V_{ж} \frac{p_0}{273 + t_p} \varphi_{п} \frac{M_{п}}{R_{\mu}}, \quad (1.2.4)$$

где  $V_{ж}$  – объем поступающей в аппарат жидкости, м<sup>3</sup>; величину  $V_{ж}$  можно определить, зная свободный объем аппарата  $V_{св}$  и степень его заполнения  $\varepsilon$ :

$$V_{ж} = \varepsilon V_{св}.$$

1.2.5. Массу паров жидкости  $m_{п.м}$ , кг/цикл, выходящих из сообщающегося с атмосферой аппарата за один цикл «малого дыхания», определяют по формуле

$$m_{п.м} = V_{св} p_{бар} \left( \frac{1 - \varphi_{п_1}}{273 + t_1} - \frac{1 - \varphi_{п_2}}{273 + t_2} \right) \frac{\bar{\varphi}_{п}}{1 - \bar{\varphi}_{п}} \frac{M_{п}}{R_{\mu}}. \quad (1.2.5)$$

1.2.6. Массу паров жидкости  $m_{п.в}$ , кг/цикл, выходящих при разгерметизации аппарата (например, периодически действующего аппарата, открываемого для загрузки или выгрузки продуктов), определяют по формуле

$$m_{п.в} = V_{св} \frac{\varphi_{п}}{T_p} (p_p - p_{бар}) \frac{M_{п}}{R_{\mu}}. \quad (1.2.6)$$

1.2.7. Объем зоны ВОК  $V_{ВОК}$ , м<sup>3</sup>, образующейся при выходе паровоздушной смеси из дыхательного патрубка аппарата, можно оценить по формуле

$$V_{\text{ВОК}} = \frac{m_{\text{п}}}{\varphi_{\text{н}}^*} K_{\text{б}}, \quad (1.2.7)$$

где  $m_{\text{п}}$  – масса паров, поступающих из аппарата в окружающее пространство за один цикл, кг/цикл;

$K_{\text{б}}$  – коэффициент запаса надежности, обычно принимаемый равным 2.

1.2.8. Суммарную массу паров  $m_{\Sigma}$ , кг/ч, поступающих в течение 1 ч в окружающее пространство из «дышащего» или периодически действующего аппарата, определяют по формуле

$$m_{\Sigma} = \frac{m_{\text{п}} N}{\tau}, \quad (1.2.8)$$

где  $N$  – количество циклов в течение периода эксплуатации аппарата;

$\tau$  – продолжительность эксплуатации аппарата, ч.

1.2.9. Для уменьшения поступления паров жидкостей из «дышащих» аппаратов в окружающее пространство используют дыхательные клапаны, с помощью которых можно создать повышенное давление среды в аппаратах (при условии достаточной прочности оборудования).

Давление срабатывания дыхательного клапана  $p_{\text{кл}}$ , при котором паровоздушная смесь не будет выходить наружу, находят из выражения

$$p_{\text{кл}} > p_1 \frac{V_1 (1 - \varphi_{\text{п}_1})}{V_2 (1 - \varphi_{\text{п}_2})} \frac{273 + t_2}{273 + t_1}. \quad (1.2.9)$$

1.2.10. Массу испарившейся с открытой поверхности жидкости  $m_{\text{и}}$ , кг, в неподвижную среду определяют по формуле

$$m_{\text{и}} = 2 \varphi_s \rho_{\text{п}} F_{\text{и}} \sqrt{\frac{D_t \tau}{3(1 - \varphi_s)}}, \quad (1.2.10)$$

где  $\rho_{\text{п}}$  – плотность пара жидкости при рабочей температуре, кг/м<sup>3</sup>;

$F_{\text{и}}$  – поверхность испарения, м<sup>2</sup>;

$D_t$  – коэффициент диффузии пара при рабочей температуре, м<sup>2</sup>/с;

$\tau$  – продолжительность испарения, с (область применения формулы (1.2.10) ограничена условиями, изложенными в параграфе 5.2.1 учебника [8]).

1.2.11. При испарении жидкости в неподвижную среду расстояние  $h_{\text{н}}$ , м (по вертикали) от поверхности жидкости до плоскости, где концентрация пара достигает НКПР, определяют по формуле

$$h_{\text{н}} = \left( 1 - \sqrt{\frac{\varphi_{\text{н}}}{\varphi_s}} \right) \sqrt{\frac{12 D \tau}{1 - \varphi_s}}. \quad (1.2.11)$$

1.2.12. При испарении жидкости в неподвижную среду параметры зоны ВОК (объем зоны ВОК  $V_{\text{ВОК}}$ , м<sup>3</sup>, и доля участия паров  $Z$  в образовании зоны ВОК) можно определить из выражений:

– при условии  $\varphi_{\text{H}} \leq \varphi_{\text{с}} \leq \varphi_{\text{В}}$

$$V_{\text{ВОК}} = F_{\text{и}} \left( 1 - \sqrt{\frac{\varphi_{\text{H}}}{\varphi_{\text{с}}}} \right) \sqrt{\frac{12 D_t \tau}{1 - \varphi_{\text{с}}}}, \quad (1.2.12)$$

$$Z = 1 - \left( \sqrt{\frac{\varphi_{\text{H}}}{\varphi_{\text{с}}}} \right)^3; \quad (1.2.13)$$

– при условии  $\varphi_{\text{с}} > \varphi_{\text{В}}$

$$V_{\text{ВОК}} = F_{\text{и}} \left( \sqrt{\frac{\varphi_{\text{В}}}{\varphi_{\text{с}}}} - \sqrt{\frac{\varphi_{\text{H}}}{\varphi_{\text{с}}}} \right) \sqrt{\frac{12 D_t \tau}{1 - \varphi_{\text{с}}}}, \quad (1.2.14)$$

$$Z = \left( \sqrt{\frac{\varphi_{\text{В}}}{\varphi_{\text{с}}}} \right)^3 - \left( \sqrt{\frac{\varphi_{\text{H}}}{\varphi_{\text{с}}}} \right)^3. \quad (1.2.15)$$

1.2.13. Массу испарившейся с поверхности пролива жидкости (не нагретой выше температуры окружающей среды)  $m_{\text{и}}$ , кг, в движущуюся или неподвижную среду допускается определять из выражения

$$m_{\text{и}} = 10^{-9} \eta \sqrt{M} \cdot p_{\text{с}} F_{\text{и}} \tau, \quad (1.2.16)$$

где  $\eta$  – коэффициент, зависящий от температуры и скорости воздушного потока в помещении; численные значения коэффициента  $\eta$  приведены в табл. 7 прил. 1.

1.2.14. Значение коэффициента диффузии газа или пара в воздух при рабочей температуре  $t_{\text{р}}$  определяют по формуле

$$D_t = D_{\text{с}} \left( \frac{t_{\text{р}} + 273}{t_{\text{с}} + 273} \right)^n, \quad (1.2.17)$$

где  $D_{\text{с}}$  – коэффициент диффузии при температуре  $t_{\text{с}}$ , м<sup>2</sup>/с (табл. 1 прил. 1);

$n$  – показатель степени, принимаемый по табл. 1 прил. 1.

1.2.15. Плотность газа или пара жидкости  $\rho_{\text{г(п)}}$ , кг/м<sup>3</sup>, при рабочей температуре  $t_{\text{р}}$  вычисляют по формуле

$$\rho_{\text{г(п)}} = \frac{M}{V_0 (1 + 0,00366 t_{\text{р}})}. \quad (1.2.18)$$

1.2.16. Среднеобъемную концентрацию горючих газов и паров в воздухе производственного помещения  $\bar{\varphi}^*$ , кг/м<sup>3</sup>, определяют по формулам (при условии, что интенсивность выделения веществ из аппаратов относительно мала и они равномерно распределяются во всем объеме помещения):

– при отсутствии воздухообмена в помещении

$$\bar{\varphi}^* = \frac{\Sigma m}{V_{\text{св}}}; \quad (1.2.19)$$

– при наличии воздухообмена в помещении

$$\bar{\varphi}^* = \frac{3600 \Sigma m}{V_{\text{св}} A \tau}; \quad (1.2.20)$$

где  $\Sigma m$  – суммарная масса горючих газов и паров, поступающих в помещение из всего технологического оборудования, кг;

$V_{\text{св}}$  – свободный объем помещения,  $V_{\text{св}} = 0,8 L B H$  ( $L$ ,  $B$ ,  $H$  – соответственно, длина, ширина и высота помещения, м);

$A$  – кратность воздухообмена в помещении, ч<sup>-1</sup>;

$\tau$  – продолжительность работы системы вентиляции помещения, с.

### Примеры

Пример 1.2.1. Определить значение коэффициента  $K_p$  в формуле (1.2.1) при давлении среды в аппарате, равном 3 МПа.

Решение. По табл. 6 прил. 1 определяем значения коэффициента  $K_p$ :

– при  $p_p = 17 \cdot 10^5$  Па  $K_p = 5,25 \cdot 10^{-5}$ ;

– при  $p_p = 41 \cdot 10^5$  Па  $K_p = 6,94 \cdot 10^{-5}$ .

На ограниченном отрезке  $17 \cdot 10^5$ – $41 \cdot 10^5$  Па можно принять линейный закон изменения величины  $K_p$  и использовать метод линейной интерполяции для его определения при  $p_p = 30 \cdot 10^5$  Па.

Тогда

$$K_p = 5,25 \cdot 10^{-5} + (30 \cdot 10^5 - 17 \cdot 10^5) \frac{6,94 \cdot 10^{-5} - 5,25 \cdot 10^{-5}}{41 \cdot 10^5 - 17 \cdot 10^5} = 6,16 \cdot 10^{-5}.$$

Пример 1.2.2. Определить молекулярную массу паровоздушной смеси над раствором этилового спирта в бензоле при 40 °С в состоянии насыщения. Состав раствора: 50 л этанола + 120 л бензола. Давление в аппарате – атмосферное.

Решение. Для определения кажущейся молекулярной массы смеси паров воспользуемся формулой, приведенной в табл. 3 прил. 1:

$$M = \sum_{i=1}^n \varphi_i M_i.$$

В примере 1.1.4 определено парциальное давление паров этилового спирта и бензола над раствором этилового спирта в бензоле при 40 °С:

$$p'_{сэ} = 7089,07 \text{ Па и } p'_{сб} = 15043,92 \text{ Па.}$$

Молекулярные массы компонентов раствора находим по табл. 1 прил. 1:

$$M_3 = 46,07 \text{ кг/кмоль и } M_6 = 78,11 \text{ кг/кмоль.}$$

Определяем состав паровоздушной смеси по формуле (1.1.8):

$$\text{– этанол: } \varphi_{сэ} = \frac{7089,07}{1 \cdot 10^5} = 0,0709 \text{ об. долей;}$$

$$\text{– бензол: } \varphi_{сб} = \frac{15043,92}{1 \cdot 10^5} = 0,1504 \text{ об. долей;}$$

$$\text{– воздух: } \varphi_{в} = 1 - (\varphi_{сэ} + \varphi_{сб}) = 1 - (0,0709 + 0,1504) = 0,7787 \text{ об. долей.}$$

Определяем кажущуюся молекулярную массу паровоздушной смеси (табл. 3 прил. 1):

$$M = 0,0709 \cdot 46,07 + 0,1504 \cdot 78,11 + 0,7787 \cdot 28,96 = 35,56 \text{ кг/кмоль.}$$

(здесь 28,96 – молекулярная масса воздуха).

Пример 1.2.3. При заполнении сборника керосином марки КО-22 паровоздушная смесь поступает в помещение. Оценить объем зоны ВОК вблизи дыхательного устройства, если температура керосина составляет 25 °С.

Решение. Проверяем выполнение необходимого признака образования ВОК снаружи аппарата (условия (1.1.15)).

По табл. 1 прил. 1 находим температуру вспышки керосина КО-22:  $t_{всп(о.т)} = 50 \text{ °С}$ .

Сравниваем рабочую температуру керосина в аппарате с его температурой вспышки:

$$(t_p = 25 \text{ °С}) < (t_{всп(о.т)} = 50 \text{ °С}).$$

Условие образования ВОК в аппарате (1.1.15) не выполняется. Следовательно, выходящая через дыхательное устройство паровоздушная смесь при заполнении сборника керосином марки КО-22 с температурой 25 °С является негорючей и зона ВОК не образуется.

Пример 1.2.4. Определить значение коэффициента диффузии пара ацетона в воздух и его плотность при 38 °С и атмосферном давлении.

Решение. По табл. 1 прил. 1 находим значение коэффициента диффузии пара ацетона при 0 °С, показатель степени и молекулярную массу:

$$D_0 = 10,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad n = 1,9; \quad M = 58,08 \text{ кг/кмоль.}$$

Значение коэффициента диффузии при 38 °С определяем по формуле (1.2.17):

$$D_{38} = 10,9 \cdot 10^{-6} \left( \frac{38 + 273}{0 + 273} \right)^{1,9} = 0,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с.}$$

Молярный объем пара при 38 °С определяем по формуле (1.1.11):

$$V_{38} = 22,41 \frac{273 + 38}{273} = 25,53 \text{ м}^3/\text{кмоль}.$$

Плотность пара ацетона при 38 °С определяем по формуле (1.2.18):

$$\rho_{\text{п}} = \frac{58,08}{22,41 (1 + 0,00366 \cdot 38)} = 2,28 \text{ кг/м}^3.$$

Пример 1.2.5. В помещении, свободный объем которого составляет 65 м<sup>3</sup>, произвели покраску полов эмалью, содержащей 30 % (масс.) растворителя – циклогексана.

Определить среднеобъемную концентрацию паров циклогексана в помещении через 15 мин и 1 ч после окончания покраски пола (временем покраски пренебречь). Расход эмали на покраску пола площадью 14 м<sup>2</sup> составил 3,2 кг. Вентиляция в помещении и теплообменные устройства отсутствуют. Температура воздуха в помещении 22 °С.

Решение. Исходя из условий задачи, считаем, что испарение растворителя из краски происходит в неподвижную среду при постоянной температуре, а стены помещения препятствуют распространению паров за пределы поверхности испарения. Для расчета массы испаряющегося растворителя с окрашенной поверхности пола используем формулу (1.2.16). Определяем величины, входящие в эту формулу.

Давление насыщенного пара циклогексана при рабочей температуре определяем по табл. 2 прил. 1:

– при  $T = 279,8 \text{ К}$   $p_s = 5332,88 \text{ Па}$ ;

– при  $T = 298,6 \text{ К}$   $p_s = 13332,2 \text{ Па}$ .

Следовательно, при  $T_p = 295 \text{ К}$  ( $t_p = 22 \text{ °С}$ )

$$p_s = 5332,88 + (295 - 279,8) \frac{13332,2 - 5332,88}{298,6 - 279,8} = 11800,42 \text{ Па}.$$

Определяем концентрацию насыщенного пара циклогексана по формуле (1.1.8):

$$\varphi_s = \frac{11800,42}{101325} = 0,116 \text{ об. долей}.$$

Находим молекулярную массу циклогексана по табл. 1 прил. 1 и определяем его молярный объем при 22 °С по формуле (1.1.11):

$$M = 84,16 \text{ кг/кмоль};$$

$$V_{22} = 22,41 \frac{273 + 22}{273} = 24,22 \text{ м}^3/\text{кмоль}.$$



Определяем плотность пара циклогексана при рабочей температуре по формуле (1.2.18):

$$\rho_{\text{п}} = \frac{84,16}{22,41 (1 + 0,00366 \cdot 22)} = 3,48 \text{ кг/м}^3.$$

Поверхность испарения равна площади пола помещения:

$$F = 14 \text{ м}^2.$$

По табл. 1 прил. 1 находим коэффициент диффузии пара циклогексана в воздух и пересчитываем его по формуле (1.2.17) при рабочей температуре:

$$D_0 = 6,46 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}; \quad n = 1,89;$$
$$D_{22} = 6,46 \cdot 10^{-6} \left( \frac{22 + 273}{0 + 273} \right)^{1,89} = 7,48 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Определяем массу растворителя, который мог бы испариться с окрашенной поверхности пола за 900 с (15 мин) и 3600 с (1 ч), по формуле (1.2.9):

– при  $\tau = 900$  с (15 мин)

$$m_{\text{и}} = 1,155 \cdot 0,118 \cdot 3,48 \cdot 14 \cdot \sqrt{\frac{7,48 \cdot 10^{-6} \cdot 900}{1 - 0,118}} = 0,58 \text{ кг};$$

– при  $\tau = 3600$  с (1 ч)

$$m_{\text{и}} = 1,155 \cdot 0,118 \cdot 3,48 \cdot 14 \cdot \sqrt{\frac{7,48 \cdot 10^{-6} \cdot 3600}{1 - 0,118}} = 1,16 \text{ кг}.$$

Находим общее количество растворителя, содержащегося в эмали:

$$m = 3,2 \cdot 0,3 = 0,96 \text{ кг},$$

где 3,2 – расход эмали на покраску пола, кг; 0,3 – содержание циклогексана в эмали, масс. доли (30 % (масс.)).

Сравнив величину  $m_{\text{и}} = 1,16$  кг с величиной  $m = 0,96$  кг, можно увидеть, что за 1 ч эмаль полностью высохнет и в окружающий воздух перейдет весь содержащийся в ней растворитель в количестве 0,96 кг.

Определяем среднеобъемную концентрацию пара циклогексана в воздухе помещения через 900 с (15 мин) и 3600 с (1 ч) после покраски пола по формуле (1.2.19):

– через  $\tau = 900$  с (15 мин)

$$\bar{\varphi}^* = \frac{0,58}{65} = 0,0089 \text{ кг/м}^3;$$

– через  $\tau = 3600$  с (1 ч)

$$\bar{\varphi}^* = \frac{0,96}{65} = 0,0148 \text{ кг/м}^3.$$

## Задачи

1.2.1. Оценить среднеобъемную концентрацию горючего вещества в производственном помещении, образующуюся вследствие его утечек из работающего под давлением герметичного оборудования. Помещение размером  $L \times B \times H$  (длина  $\times$  ширина  $\times$  высота) оборудовано приточно-вытяжной вентиляцией. В технологическом процессе используется новая аппаратура.

Вид горючего вещества, давление среды в аппарате  $p_p$  и температуру  $t_p$ , суммарный свободный объем аппаратуры, заполненный горючим газом (паром), принять по табл. 1.2.1. Температура воздуха в помещении  $t_b = t_p$ .

Таблица 1.2.1

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Горючее вещество	Метан	Метиловый спирт	Этан	Этиловый спирт	Пропан	н-Пропиловый спирт	Бутан	н-Бутиловый спирт	Аммиак	Оксид углерода CO
Давление $p_p$ , МПа	2,0	4,5	8,0	0,6	10,0	1,5	4,0	2,5	6,0	32,0
Температура $t_p$ , °C	350	150	300	180	250	200	325	225	450	380
Свободный объем аппаратуры, м <sup>3</sup>	25	65	60	85	150	100	130	75	40	20
Кратность воздухообмена, ч <sup>-1</sup>	2	3	4	2	5	4	3	2	3	5
$L \times B \times H$ , м	20 $\times$ 10 $\times$ 4		18 $\times$ 12 $\times$ 5		16 $\times$ 16 $\times$ 4		12 $\times$ 12 $\times$ 5		25 $\times$ 20 $\times$ 6	

1.2.2. Определить объем зоны ВОК, которая может образоваться при выходе паровоздушной смеси из дыхательного патрубка емкости, расположенной в производственном помещении:

– за один цикл «большого дыхания» при заполнении пустой емкости продуктом с температурой  $t_n$ ;

– за один цикл «малого дыхания» при нагревании продукта в емкости.

Предложить мероприятия, направленные на предотвращение образования зоны ВОК.

Вид продукта, свободный объем емкости, степень ее заполнения, начальная  $t_n$  и конечная  $t_k$  температуры продукта приведены в табл. 1.2.2. Рабочее давление в емкости – атмосферное ( $p_p \approx 1 \cdot 10^5$  Па). Температура воздуха в помещении  $t_b = t_k$ .

Таблица 1.2.2

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Продукт	Толуол	Циклогексан	Изооктан	Метиловый спирт	Метилэтил-кетон	н-Октан	Ацетон	Бензол	н-Гексан	н-Гептан
Объем емкости, м <sup>3</sup>	30	20	15	20	35	20	10	25	15	30
Степень заполнения, ε	0,5	0,6	0,7	0,2	0,4	0,8	0,6	0,5	0,9	0,4
Начальная температура, °С	15	16	14	15	12	10	13	12	11	14
Конечная температура, °С	22	24	20	23	21	22	20	24	18	20

1.2.3. В помещении цеха размером  $L \times B \times H$  (длина×ширина×высота) установлены три одинаковых мерника с дыхательными устройствами, которые периодически заполняются водным раствором ЛВЖ. Совмещенные циклограммы работы трех одинаковых мерников показаны на рис. 1.2.1 (см. параграф 1.1 [8]).



Рис. 1.2.1. Совмещенные циклограммы работы трех одинаковых мерников

Определить массу паров ЛВЖ, поступающих из мерников в помещение цеха в течение 1 ч, среднеобъемную концентрацию паров ЛВЖ в цехе, оборудованном вентиляцией с кратностью воздухообмена  $6 \text{ ч}^{-1}$ , и возможность образования зон ВОК. Температура воздуха в цехе  $25 \text{ °С}$ .

Вид ЛВЖ и его концентрацию в растворе, а также другие данные для расчетов принять по табл. 1.2.3. Давление в мерниках – атмосферное.

Таблица 1.2.3

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Легковоспламеняющаяся жидкость	Этиловый спирт	Пропиловый спирт	Ацетон	Метиловый спирт	Уксусная кислота	Пропиловый спирт	Этиловый спирт	Ацетон	Уксусная кислота	Метиловый спирт
Концентрация ЛВЖ в растворе, % (масс.)	70	40	25	40	80	85	90	40	90	85
Объем мерника, м <sup>3</sup>	1,5	2,0	3,0	1,9	2,5	2,4	1,9	2,7	1,6	2,6
Степень заполнения, ε	0,9	0,7	0,4	0,8	0,5	0,7	0,8	0,6	0,9	0,8
Температура раствора, °С	35	45	25	40	70	50	40	15	60	25
$L \times B \times H$ , м	9×6×4		12×8×4		10×5×4		12×6×6		12×8×5	

*Примечание.* Для оценки возможности образования ВОК в мерниках воспользоваться табл. 8 и 9 прил. 1.

1.2.4. В помещение склада размером  $L \times B \times H$  (длина×ширина×высота), не оборудованного приточно-вытяжной вентиляцией, вносят баки с ЛВЖ, длительно хранившиеся на открытом воздухе. Баки оборудованы дыхательными патрубками.

Определить массу паров ЛВЖ, поступающих из баков в помещение склада, и оценить возможность образования зон ВОК. Предложить мероприятия, направленные на предотвращение образования зон ВОК.

Вид ЛВЖ в баках принять по табл. 1.2.2, давление в баках – атмосферное. Объем баков  $V$ , степень их заполнения  $\epsilon$ , количество баков  $N$ , температуру воздуха снаружи помещения  $t_c$  и в помещении склада  $t_n$  принять по табл. 1.2.4.

Таблица 1.2.4

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Объем бака, л	25	30	40	50	45	35	20	60	55	65	
Степень заполнения, ε	0,6	0,5	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,4	0,8	0,5	
Количество баков, шт.	20	25	20	15	15	30	30	15	10	15	
Температура воздуха, °С	снаружи	-9	-12	-6	0	5	-2	-15	-8	-10	2
	в помещении	18	15	17	26	24	20	22	15	14	20
$L \times B \times H$ , м	9×6×3		8×6×4		10×5×3		12×4×4		9×4×4		

1.2.5. В процессе приготовления раствора продукта используется периодически действующий смеситель, работающий в следующем режиме: загрузка, нагрев сырья до  $t_p$ , перемешивание, охлаждение продукта до начальной температуры, выгрузка. Продолжительность цикла – 1 ч. Принять температуру сырья в аппарате во время перемешивания  $t_p = 0,5t_{\text{кип}}$  ( $t_{\text{кип}}$  – температура кипения растворителя). Стадии перемешивания и охлаждения производятся при закрытом дыхательном патрубке, остальные – при открытом.

Определить среднеобъемную концентрацию паров растворителя в производственном помещении, имеющем свободный объем  $75 \text{ м}^3$ , воздухообмен кратностью  $10 \text{ ч}^{-1}$  и температуру воздуха  $24 \text{ }^\circ\text{C}$ . Вид растворителя и другие данные для расчетов принять по табл. 1.2.5.

Таблица 1.2.5

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Растворитель	Толуол	Циклогексан	Изооктан	Метилловый спирт	н-Декан	н-Октан	Ацетон	Бензол	н-Гексан	н-Гептан
Геометрический объем смесителя, $\text{м}^3$	50	100	75	200	50	20	40	60	80	150
Степень заполнения, $\epsilon$	0,5	0,6	0,7	0,2	0,4	0,8	0,6	0,5	0,9	0,4
Начальная температура продукта, $^\circ\text{C}$	22	24	20	23	21	22	20	24	18	20

*Примечание.* В помещение поступают пары растворителя при «большом дыхании» во время загрузки сырья, «малом дыхании» при нагреве, а также при разгерметизации аппарата для выгрузки продукта.

1.2.6. В помещение склада вносят длительно хранившиеся на открытом воздухе баки с легковоспламеняющейся жидкостью. Патрубки баков оборудованы дыхательными клапанами.

Определить минимальное давление срабатывания дыхательного клапана, при котором паровоздушная смесь не будет выходить наружу.

Начальное давление в баках – атмосферное. Другие данные для расчетов принять по табл. 1.2.6.

Таблица 1.2.6

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Легковоспламеняющаяся жидкость	Толуол	Циклогексан	Изооктан	Метилловый спирт	н-Декан	н-Октан	Ацетон	Бензол	н-Гексан	н-Гептан
Начальная температура ЛВЖ в баке, $^\circ\text{C}$	-8	-12	-10	0	19	-5	-8	-15	-3	2
Конечная температура ЛВЖ в баке, $^\circ\text{C}$	22	24	20	23	28	22	20	24	18	20

1.2.7. В производственной лаборатории при проведении испытаний на химическую стойкость образцы изделий помещают в специальную ванну и заливают органической жидкостью, толщина слоя которой составляет 0,5 м. Ванна имеет высоту стенок 1,8 м и габариты в плане 1,5 × 0,8 м. Система местных отсосов паров из ванны и общеобменная вентиляция в лаборатории не работают (то есть воздушную среду можно считать неподвижной).

Определить минимальное время, в течение которого пары органической жидкости заполнят все свободное пространство в ванне и начнут выходить за ее пределы (снижением уровня жидкости в ванне при ее испарении пренебречь), а также массу испарившейся за это время жидкости.

Вид органической жидкости принять по табл. 1.2.2. Температуры жидкости  $t_p$  и воздуха в помещении  $t_n$  принять равными  $t_k$  (табл. 1.2.2) с учетом того, что  $t_p = t_n = t_k = \text{const}$ .

1.2.8. Ванна для обезжиривания изделий размещена в специальной камере, огражденной по периметру высокими бортами.

Определить время от момента заполнения ванны растворителем до момента возможного воспламенения паровоздушной смеси в камере от переносного светильника невзрывозащищенного исполнения, расположенного на высоте  $h$  от уровня растворителя в ванне. Определить параметры зоны ВОК в момент возможного воспламенения паровоздушной смеси при условии, что вентиляция в камере отключена и боковые технологические проемы закрыты (среду в камере считать неподвижной).

Вид растворителя, площадь пола камеры и поперечного сечения ванны и другие данные для расчета принять по табл. 1.2.7.

Таблица 1.2.7

Номер варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Растворитель	Толуол	Циклогексан	Изооктан	Метиловый спирт	Метилкетон	н-Октан	Ацетон	Бензол	н-Гексан	н-Гептан
Температура воздуха и растворителя, °С	24	27	24	17	19	25	22	18	17	21
Площадь пола и сечения ванны, м <sup>2</sup>	6×3		8×4		6×4		4×3		8×3	
Высота размещения светильника $h$ , м	0,4	0,8	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0,6

1.2.9. При расфасовке готовой продукции в бутылки избыток пожароопасной жидкости скапливается в поддоне, имеющем размеры в плане 2,5 × 0,8 м.

Определить массу испаряющейся из поддона в течение 1 ч жидкости и среднеобъемную концентрацию горючих паров в воздухе производственного помещения, оборудованного приточно-вытяжной вентиляцией

## Оглавление

<b>Глава 1. Анализ пожарной опасности и защиты технологического оборудования с пожаровзрывоопасными средами.....</b>	<b>3</b>
1.1. Оценка пожаровзрывоопасности среды внутри технологического оборудования и способы обеспечения пожарной безопасности.....	3
1.2. Оценка пожаровзрывоопасности среды снаружи нормально работающего технологического оборудования и способы обеспечения пожарной безопасности .....	18
1.3. Причины повреждения технологического оборудования и способы обеспечения пожарной безопасности .....	31
1.4. Оценка пожаровзрывоопасности среды в зоне выхода горючих веществ из поврежденного технологического оборудования и способы обеспечения пожарной безопасности .....	47
1.5. Производственные источники зажигания и способы обеспечения пожарной безопасности .....	61
1.6. Распространение пожара на производстве и способы обеспечения пожарной безопасности .....	71
<b>Глава 2. Параметры пожароопасных зон, образующихся при реализации аварийных ситуаций на наружных технологических установках .....</b>	<b>84</b>
2.1. Параметры зоны поражения высокотемпературными продуктами сгорания газопаровоздушной смеси .....	84
2.2. Параметры зоны поражения волной давления при сгорании газо-, паро- или пылевоздушного облака в открытом пространстве .....	88
2.3. Параметры зоны поражения тепловым излучением пожара пролива.....	94
2.4. Параметры зоны поражения тепловым излучением огненного шара.....	99
2.5. Параметры зоны поражения волной давления при взрыве аппарата с перегретой жидкостью или сжиженным газом в очаге пожара ....	101
<b>Глава 3. Технические решения, направленные на обеспечение пожарной безопасности технологических процессов .....</b>	<b>104</b>
3.1. Проверочный расчет на прочность технологического аппарата с агрессивной пожаровзрывоопасной средой .....	104
3.2. Расчет линзового температурного компенсатора .....	109
3.3. Расчет гравийного огнепреградителя.....	113
3.4. Расчет наружной паровой завесы .....	117
3.5. Расчет системы аварийного слива .....	121
3.6. Расчет разрывной предохранительной мембраны .....	126
3.7. Расчет предохранительного клапана.....	130
3.8. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности .....	136
<b>Приложения.....</b>	<b>150</b>
Приложение 1 .....	150
Приложение 2 .....	170
<b>Литература .....</b>	<b>173</b>

*Учебное издание*

ГОРЯЧЕВ Станислав Анатольевич  
КЛУБАНЬ Владимир Семенович  
ПАНАСЕВИЧ Людмила Тихоновна  
ПЕТРОВ Анатолий Павлович

**СБОРНИК ЗАДАЧ ПО КУРСУ  
«ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ»**

Учебное пособие

Редактор *Е. В. Ермакова*  
Технический редактор *Г. А. Габдулина*  
Корректор *Н. В. Федькова*

Подписано в печать 19.05.2015. Формат 60×90 1/16.  
Печ. л. 11.0. Уч.-изд. л. 7,9. Бумага офсетная.  
Тираж 400 экз. Заказ 222

Академия ГПС МЧС России  
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4