

ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ, ВЫЗВАННЫЕ ВЗРЫВАМИ

**Взрыв
парогазовоздушного облака
в неограниченном и
ограниченном
пространстве**

Взрыв парогазовоздушного облака в неограниченном пространстве

Парогазовоздушное облако образуется при авариях в системах переработки, транспортировки и хранения сжиженных и сжатых газов, а также при испарении разлившейся горючей жидкости (нефть, бензин, бензол и т.п.).

Характерными особенностями взрывов облаков газопаровоздушных смесей являются:

- возникновение взрывов разного типа (детонационного, дефлаграционного или комбинированного);
- образование пяти зон поражения (детонационной, огненного шара, действия ударной волны, теплового поражения и токсического воздействия);
- воспламенение газопаровоздушной смеси, которое происходит при наличии источника зажигания, когда концентрация топлива в смеси находится в пределах между НКПР и ВКПР пламени.

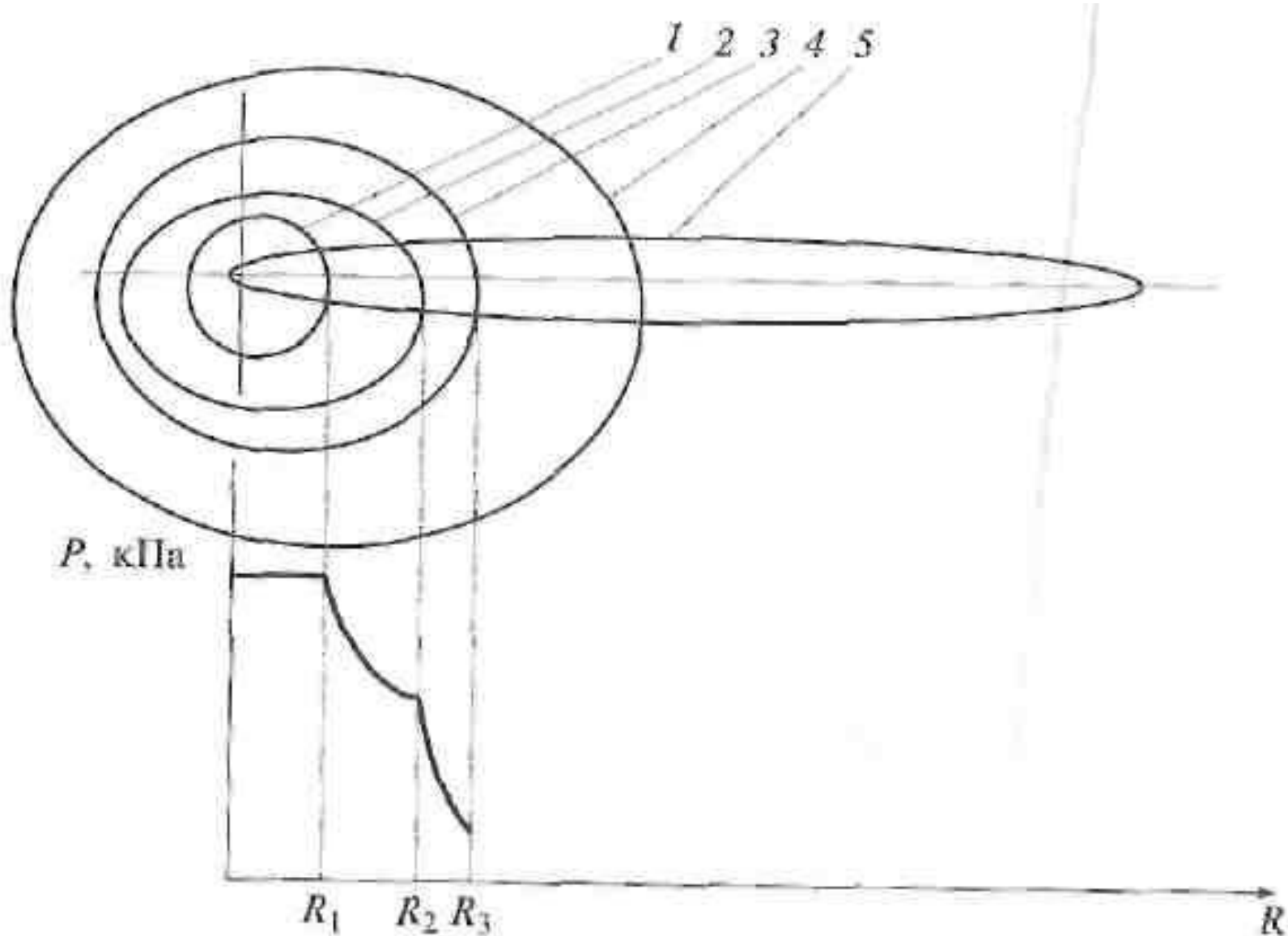


Рисунок. Зоны поражения при взрыве облака газопаровоздушной смеси:
1 — детонационная; 2 — «огненного шара»; 3 — действия ударной волны;
4 — теплового поражения; 5 — токсического воздействия

Радиус зоны детонационного взрыва, в пределах которой давление на фронте ударной волны постоянно и равно $\Delta P_{\Phi} = 1\,750$ кПа, можно определить по следующей формуле, м:

$$R_1 = 1,75 \sqrt[3]{m_{\text{ТНТ}}^{\text{газ}}}$$

где $m_{\text{ТНТ}}^{\text{газ}}$ — тротильный эквивалент взрывоопасного газа (пара), кг;

$$m_{\text{ТНТ}} = \eta \frac{Q_{\text{vгаз}}}{Q_{\text{vТНТ}}} m_{\text{газ}}$$

Здесь η — коэффициент, зависящий от способа хранения горючего вещества (1 — для газа; 0,6 — для сжиженного газа под давлением; 0,1 — для сжиженного газа при пониженной температуре (изотермическое хранение); 0,06 — аварийный разлив легковоспламеняющейся жидкости (ЛВЖ)); $Q_{\text{vгаз}}$ — энергия взрыва газа, кДж/кг (см. табл. 3); $Q_{\text{vТНТ}} = 4520$ кДж/кг — энергия взрыва тринитротолуола (тротила); $m_{\text{газ}}$ — масса горючего газа, кг.

Радиус зоны взрывного горения («огненного шара»), м,

$$R_2 = 1,7 R_1. \quad (17)$$

Как видно из рисунка, избыточное давление на фронте ударной волны в пределах огненного шара снижается от $\Delta P_{\phi} = 1\,750$ кПа на границе зоны детонационного взрыва до величины, определяемой по формуле, кПа,

$$\Delta P_{\phi 2} = 1\,300 \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^3 + 50.$$

Избыточное давление на границе действия зоны ударной волны ($R_3 > R_2 = 1,7 R_1$), кПа,

$$\Delta P_{\phi 3} = \frac{233}{\sqrt{1 + 0,41 (R_3/R_1)^3} - 1}.$$

Зная величину избыточного давления на фронте ударной волны на расстоянии R_3 от центра облака газопаровоздушной смеси, по таблице «Давление ΔP_{ϕ} , кПа, соответствующее степени разрушения» можно определить степень поражения людей и разрушения зданий.

Пример

Оценить последствия взрыва одиночного резервуара, содержащего 15 т сжиженного метана.

Определить:

- размеры зон детонационного взрыва (R_1) и «огненного шара» (R_2);
- степень поражения людей и зданий ударной волной на расстоянии $R = R_2 + 75$, м.

Решение:

1. По формуле (16) найдем тротиловый эквивалент метана, учитывая, что для сжиженного газа под давлением $\eta = 0,6$, расчетная масса газа при одиночном хранении составляет 50 % массы газа в резервуаре и $Q_{\text{вмет}} = 50 * 10^3$ кДж/кг (см. табл. 3), кг:

$$m_{\text{ТТТ}} = 0,6 \cdot (50\,000/4\,250)(15\,000/2) = 49\,778,8.$$

2. Радиус зоны детонационного взрыва [см. формулу (15)], м,

$$R_1 = 1,75 \sqrt[3]{49\,778,8} = 138,08.$$

3. Радиус зоны взрывного горения [см. формулу (17)], м,

$$R_2 = 1,7 \cdot 138,08 = 234,7.$$

4. Избыточное давление на фронте ударной волны на расстоянии $R = 234,7 + 75 = 309,7$ м определим по формуле (18), кПа:

$$\Delta P_{\phi 309,7} = \frac{233}{\sqrt{1 + 0,41(309,7 / 138,08)^3 - 1}} = 168,8.$$

При таком избыточном давлении на фронте ударной волны будут разрушены все сооружения и погибнут все люди.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЯ

На производственном объекте произошло разрушение резервуара с _____ вместимостью V_1 м³. На расстоянии R м от резервуара находится диспетчерская, располагающаяся в _____ здании, в котором во время аварии находились N чел. Плотность распределения персонала на производственном объекте P чел./км². Температура окружающей среды T_{oc} .

Определить размеры зон детонационного взрыва и «огненного шара», степень разрушения здания диспетчерской и потери среди персонала.

Оценка последствий взрыва ПГВО в неограниченном пространстве

№ варианта	Вещество	M, кг/кмоль	V ₁ , м ³	R, м	Тип здания	N, чел.	P, чел./км ²
1	Аммиак NH ₃	15	50	100	Кирпичное	5	500
2	Ацетон C ₃ H ₆ O	58	75	100	С легким каркасом	6	600
3	Ацетилен C ₂ H ₂	26	100	100	Деревянное	7	500
4	Бутан C ₄ H ₁₀	58	125	100	Кирпичное	8	800
5	Бутадиен C ₄ H ₈	56	150	100	С легким каркасом	9	850
6	Бензол C ₆ H ₆	78	175	100	Деревянное	10	900
7	Бензин	94	200	100	Кирпичное	5	500
8	Водород H ₂	2	250	100	С легким каркасом	6	600
9	Метан CH ₄	16	300	100	Деревянное	7	500
10	Нефть C ₁₇ H ₃₈	240	1000	100	Кирпичное	8	800
11	Пропан C ₃ H ₈	44	400	100	С легким каркасом	9	850
12	Этилен C ₂ H ₄	28	450	100	Деревянное	10	900
13	Аммиак NH ₃	15	500	100	Кирпичное	5	500
14	Ацетон C ₃ H ₆ O	58	550	100	С легким каркасом	6	600
15	Ацетилен C ₂ H ₂	26	50	100	Деревянное	7	500
16	Бутан C ₄ H ₁₀	58	100	100	Кирпичное	8	800
17	Бутадиен C ₄ H ₈	56	150	100	С легким каркасом	9	850
18	Бензол C ₆ H ₆	78	1000	100	Деревянное	10	900
19	Бензин	94	1500	100	Кирпичное	5	500
20	Водород H ₂	2	1000	100	С легким каркасом	6	600

Взрыв парогазовоздушного облака в ограниченном и пространстве

Парогазовоздушное облако может образоваться в ограниченном пространстве как на производстве (разгерметизация технологических агрегатов и трубопроводов с выбросом газа или разливом ЛВЖ), так и в быту (утечка газа из баллона, негерметичность газовых кранов и газопроводов, разлив ЛВЖ типа бензина и т.п.).

При анализе сценариев аварий рассматриваемого типа принимают, что все содержимое аппаратов поступает в помещение и одновременно происходит утечка вещества из подводящего и отводящего трубопроводов в течение времени, необходимого для отключения трубопроводов.

Обычно принимают, что расчетное время отключения трубопроводов с автоматическим управлением составляет 120 с, с ручным — 300 с.

Масса газа, кг, поступившего в помещение при аварии,

$$m_{\Gamma} = (V_a + V_{\Gamma}) \rho_{\Gamma},$$

где V_a — объем газа, вышедшего из аппарата (баллона, резервуара), м^3 ; V_{Γ} — объем газа, вышедшего из трубопровода, м^3 ;

$$V_a = 0,01 P_1 V_1,$$

где P_1 — давление в аппарате, кПа; V_1 — объем аппарата, м^3 ;

$$V_{\Gamma} = V_{\Gamma 1} + V_{\Gamma 2},$$

$V_{\Gamma 1}$ — объем газа, вышедшего из трубопровода до его отключения, м^3 ;

$V_{\Gamma 2}$ — объем газа, вышедшего из трубопровода после его отключения, м^3 ;

$$V_{\tau 1} = Q\tau,$$

где Q — расход газа, определяемый в соответствии с технологическим регламентом в зависимости от давления в трубопроводе, его диаметра, температуры газа, м³/с;
 τ — время отключения газопровода;

$$V_{\tau 2} = 0,01\pi P_2 \sum r_i^2 L_i,$$

где P_2 — максимальное давление в трубопроводе по технологическому регламенту, кПа;
 r_i — внутренний радиус i -го участка трубопровода, м;
 L_i — длина трубопроводов от аварийного аппарата до задвижек, м.

При аварии аппарата (резервуара) с ЛВЖ часть жидкости может находиться в виде пара, вырывающегося при аварии в окружающее пространство, образуя *первичное облако*. Оставшаяся жидкость при аварии аппарата (резервуара) разливается внутри помещения с последующим испарением с зеркала разлива с образованием *вторичного облака*.

Масса пара в первичном облаке, кг,

$$m_{\text{пл}} = \alpha \frac{\mu}{R} \frac{V_1 P_1 + V_T P_2}{T_{\text{ж}}},$$

где α — объемная доля оборудования, заполненная газовой фазой (обычно около 0,2);

μ — молекулярная масса жидкости, кг/кмоль;

R — универсальная газовая постоянная газа, равная 8,31 кДж/(К*кмоль);

V_1 , P_1 , V_T и P_2 — то же, что и в формуле (19);

$T_{\text{ж}}$ — температура жидкости в аппаратуре, К.

Разлившаяся жидкость с температурой $T_{\text{ж}} < T_{\text{кип}}$ испаряется с образованием пара массой, кг,

$$m_{\text{п исп}} = WF_{\text{исп}}\tau_{\text{исп}},$$

где W — интенсивность испарения жидкости, кг/(м²*с);

$F_{\text{исп}}$ — площадь испарения, определяемая исходя из расчета, что 1 л смесей и растворов, содержащих по массе 70 % и менее растворителей, разливается по площади 0,5 кв.м, а 1 л остальных жидкостей — на 1 кв.м пола помещения;

$\tau_{\text{исп}}$ — время испарения разлившейся жидкости, с, равное либо времени полного испарения [$\tau_{\text{исп}} = m_{\text{ж}} / (WF_{\text{исп}})$], либо ограничиваемое временем 3 600 с, в течение которых должны быть приняты меры по устранению аварии.

Интенсивность испарения разлившейся жидкости в помещении, кг/(м²*с), в рассматриваемом случае определяется по формуле

$$W = 10^{-6} \eta \sqrt{\mu} P_{\text{нас}}$$

где η — коэффициент, зависящий от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью испарения (табл. 6);

$P_{\text{нас}}$ — давление насыщенного пара, кПа, которое находят по справочной литературе.

Таблица 6. Значения коэффициента η

Скорость воздушного потока, м/с	Температура в помещении t, °С				
	10	15	20	30	35
0	1	1	1	1	1
0,1	3,0	2,6	2,4	1,8	1,6
0,2	4,6	3,8	3,5	2,4	2,3
0,5	6,6	5,7	5,4	3,6	3,2
1	10	8,7	7,7	5,6	4,6

Избыточное давление взрыва ΔP_{Φ} , кПа, для индивидуальных горючих веществ, состоящих из атомов С, Н, О, Cl, Br, F, определяют по формуле

$$\Delta P_{\Phi} = \frac{100(P_{\max} - P_0)mZ}{(1 + A_{\text{ав}}\tau_{\text{ав}})V_{\text{св}}\rho_{\Gamma}c_{\text{ст}}K_{\text{н}}},$$

где P_{\max} — максимальное давление взрыва стехиометрической газопаровоздушной смеси в замкнутом объеме, определяемое по справочным данным (при отсутствии данных допускается принимать равным 900 кПа); P_0 — давление окружающей среды, принимаемое равным 101,3 кПа; m — масса горючего газа или паров ЛВЖ в помещении, кг; Z — коэффициент участия горючего во взрыве, принимаемый равным 1 для водорода, 0,5 — для других горючих газов, 0,3 — для паров легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, 0,5 — для горючих пылей; $A_{\text{ав}}$ — кратность воздухообмена аварийной вентиляции, ч⁻¹; $\tau_{\text{ав}}$ — время работы аварийной вентиляции, ч; $V_{\text{св}}$ — свободный объем помещения, куб.м (можно принять равным 80 % помещения); ρ_{Γ} — плотность газа (пара) при расчетной температуре, кг/м³; $c_{\text{ст}}$ — стехиометрическая концентрация горючего, об. %; $K_{\text{н}}$ — коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатность процессов горения, принимаемый равным 3.

$$c_{\text{CT}} = 100 / (1 + 4,84\beta),$$

где β — стехиометрический коэффициент кислорода в реакции горения, $\beta = n_c + 0,25(n_H - n_X) - 0,5n_O$ (n_c , n_H , n_X , n_O — число атомов С, Н, О и галогенов в молекуле горючего).

Плотность газа (пара) можно найти по формуле

$$\rho_r = \frac{M}{V_0(1 + 0,00367t_p)},$$

где V_0 — молярный объем, равный 22,4 куб.м/кмоль;

t_p — расчетная температура, °С.

Величина избыточного давления взрыва [см. формулу (22)] является определяющей при категорировании помещений по взрывопожарной и пожарной опасности. На основании категорирования помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности в соответствии со СНиП 2.09.02 — 85 и СНиП 2.01.02 — 85 принимаются проектные решения, направленные на ограничение пожаров и взрывов.

Пример

Насосный зал нефтеперерабатывающего предприятия имеет размеры 54 x 12 x 8,5 м. В зале расположены четыре центробежных магистральных насоса, два из которых находятся в рабочем состоянии, два — резервные. Производительность каждого насоса $Q = 2,78 \text{ м}^3/\text{с}$. Нефть находится в насосе с максимальным объемом заполнения аппарата $V_{an} = 25,76 \text{ м}^3$. Насос занимает площадь 4,6 x 2,8 м.

Отсечные вентили находятся в помещении насосной, а длины подводящего и отводящего нефтепроводов диаметром $d = 1020 \text{ мм}$ составляют $l_1 = 3 \text{ м}$ и $l_2 = 4,4 \text{ м}$ соответственно. Помещение насосного зала оборудовано системой аварийной вентиляции с кратностью $A_{ав} = 9 \text{ ч}^{-1}$. Температура нефти равна средней максимальной температуре $t_{н} = 22,4 \text{ град.С}$, скорость воздуха в помещении при работе аварийной вентиляции составляет 1 м/с.

Оценить возможные последствия аварийного разлива нефти и последующего взрыва в результате разгерметизации одного магистрального нефтеперекачивающего насоса.

Решение:

1. Объем нефти, вышедшей из трубопроводов, м³,

$$V_{\text{тр}} = Q\tau + \frac{\pi d^2}{4} (L_1 + L_2) = 2,78 \cdot 120 + \frac{3,14 \cdot 1,02^2}{4} (3 + 4,4) = 339,6,$$

где τ — время автоматического отключения насоса, принимаемое равным 2 мин (120 с).

Рассчитаем объем нефти, поступившей в помещение насосной (с учетом вылива из насоса, м³):

$$V_{\text{из}} = V_{\text{тр}} + V_{\text{ап}} = 339,6 + 25,76 = 365,36.$$

2. Найдем толщину слоя разлившейся нефти с учетом размеров насосной и оборудования.

Учитывая, что площадь помещения составляет $F_{\text{пом}} = 54 * 12 = 648$ м²,

а насосы занимают площадь $F_{\text{нас}} = 4 * 4,6 * 2,8 = 51,52$ м²,
определим величину свободной площади пола, м²:

$$F_{\text{св.пола}} = F_{\text{пом}} - F_{\text{нас}} = 648 - 51,52 = 596,48.$$

Поступившая в помещение насосной нефть покрывает всю свободную площадь пола слоем высотой, м,

$$\delta = V_{\text{нл}} / F_{\text{св.пола}} = 365,36 / 596,48 = 0,61.$$

3. Интенсивность испарения ЛВЖ, не нагретой до температуры кипения, вычислим по формуле (21), заимствуя давление насыщенных паров нефти из справочной литературы

$$P_{нас} = 2,95 \text{ кПа.}$$

Тогда интенсивность испарения нефти составит [см. формулу (21)], кг/(м²*с),

$$W_{исп} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 7,7 \cdot 2,95 \sqrt{240} = 3,53 \cdot 10^{-4}.$$

Здесь в соответствии с табл. 6 при температуре в помещении около 20 °С и скорости воздушного потока 1 м/с коэффициент $\eta = 7,7$.

Массу паров нефти, образующихся при аварийном разливе, определим по формуле (20), кг:

$$m_{п} = 3,53 \cdot 10^{-4} \cdot 596,48 \cdot 3\,600 = 758.$$

Здесь время испарения нефти принято равным 3 600 с.

4. Поскольку масса разлившейся нефти при ее плотности $\rho_{\text{неф}} = 860$ кг/м³ составляет, кг,

$$m_{\text{зал}} = V_{\text{зал}} \rho_{\text{неф}} = 365,36 \cdot 860 = 314\,209,6.$$

то за время аварийной ситуации, равное 3 600 с, испарится в объеме помещения только $(758 / 314209,6) \cdot 100 = 0,24\%$ разлившейся нефти.

5. По формуле (24) найдем плотность паров нефти, кг/м³:

$$\rho_{\text{г}} = \frac{240}{22,4 (1 + 0,00367 \cdot 22,4)} = 9,9.$$

6. Избыточное давление во фронте ударной волны при взрыве паров нефти вычислим по формуле (22), в которой дополнительно учтем уменьшение массы взрывоопасной смеси в результате работы аварийной вентиляции, кПа:

$$\Delta P_{\text{ф}} = \frac{100 \cdot (900 - 101,3) \cdot 758 \cdot 0,3}{(1 + 9 \cdot 1) \cdot 4\,406,4 \cdot 9,9 \cdot 0,77 \cdot 3} = 18.$$

При расчете по формуле (22) принято, что:

- коэффициент участия горючего во взрыве для ЛВЖ, нагретых до температуры ниже температуры вспышки, равен 0,3;
- свободный объем помещения равен 80 % геометрического объема помещения, м³:

$$V_{\text{св}} = 0,8 \cdot 54 \cdot 12 \cdot 8,5 = 4\,406,4;$$

- молекуляр ует формула $C_{17}H_{38}$ ($n_c = 17$, $n_H = 38$, $\beta = 17 + 0,25 \cdot 38 = 26,5$), а стехиометрическая концентрация паров нефти определяется по формуле (23), об. %:

$$C_{\text{стх}} = \frac{100}{1 + 4,84 \cdot 26,5} = 0,77;$$

- коэффициент негерметичности и неадиабатности процесса горения $K_H = 3$;
- уменьшение массы взрывоопасной смеси в результате работы аварийной вентиляции учитывается множителем $(1 + A_{\text{ав}} \tau)$, где τ — время испарения нефти, принятое равным 1 ч (3 600 с).

7. Поскольку основные строительные конструкции здания насосной являются железобетонными, а $\Delta P_{\text{доп}} = 25$ кПа, то здание разрушено не будет.

В том случае, когда аварийная вентиляция не работает или отсутствует, избыточное давление во фронте ударной волны увеличится на порядок и составит $\Delta P_{\text{ф}} = 180$ кПа, что приведет к полному разрушению здания насосной и гибели персонала.

ЗАДАНИЕ

Насосный зал нефтеперерабатывающего предприятия имеет размеры $A \times B \times H$ м. В зале расположены центробежные магистральные насосы НМ-1000 х 210. Производительность каждого насоса Q м³/ч, создаваемое давление $P = 2,1 \cdot 10^5$ кПа. Нефть находится в насосе с максимальным объемом заполнения $V_{\text{ан}}$ м³. Отсечные вентили (автоматическое отключение) находятся в помещении насосной, а длины подводящего и отводящего нефтепроводов радиусом r мм соответственно равны L_1 и L_2 м. Помещение насосного зала оборудовано системой аварийной вентиляции с кратностью $K_{\text{ав}} = 10$ ч⁻¹. Температура нефти равна средней максимальной температуре $t_{\text{н}} = 22,4$ град. С. Скорость воздушного потока 1 м/с.

Оценить последствия аварийного разлива нефти в результате разгерметизации одного магистрального нефтеперекачивающего насоса при включенной и выключенной аварийной вентиляции.

№ варианта	А x В x Н, м	Q, м ³ /ч	Количество насосов	V _{ан} , м ³	г, мм	L ₁ , м	L ₂ , м
1	35 x 10 x 6	800	2	20,4	510	2	3,5
2	20 x 15 x 4	900	3	18,3	430	1,8	3,3
3	43 x 8 x 5	1000	4	25,7	590	2,5	3
4	40 x 12 x 3	700	2	15,6	350	1,5	2,5
5	80 x 20 x 4	1000	5	26,3	630	2,8	4,3
6	35 x 10 x 6	800	2	21,3	510	2	3,5
7	40 x 11 x 9	1 000	3	24,2	520	3	4,4
8	42 x 12 x 12	900	4	20,4	530	3,2	4,6
9	44 x 13 x 15	700	2	18,3	540	3,4	4,8
10	20 x 8 x 5	600	5	25,7	550	3,6	5
11	50 x 15 x 7	800	2	15,6	600	3,1	4,5
12	40 x 10 x 5	1 100	3	26,3	500	5	6,1
13	25 x 13 x 7	900	4	24,2	400	1,2	2,3
14	20 x 10 x 8	750	2	21,3	350	2,1	3,6
15	36 x 11 x 7	830	5	20,4	520	2,2	3,7
16	45 x 14 x 16	950	2	18,3	570	3,4	4,8
17	50 x 16 x 8	820	3	25,7	630	3,1	4,5
18	25 x 10 x 11	550	4	15,6	550	3,5	4,9
19	30 x 15 x 8	920	2	26,3	430	1,3	2,6
20	35 x 10 x 6	790	5	21,3	500	2,2	3,7
21	45 x 14 x 11	1050	2	24,2	580	3,4	4,8
22	22 x 9 x 7	600	3	20,4	545	3,2	4,6
23	33 x 12 x 9	450	4	18,3	490	2	3,5