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.

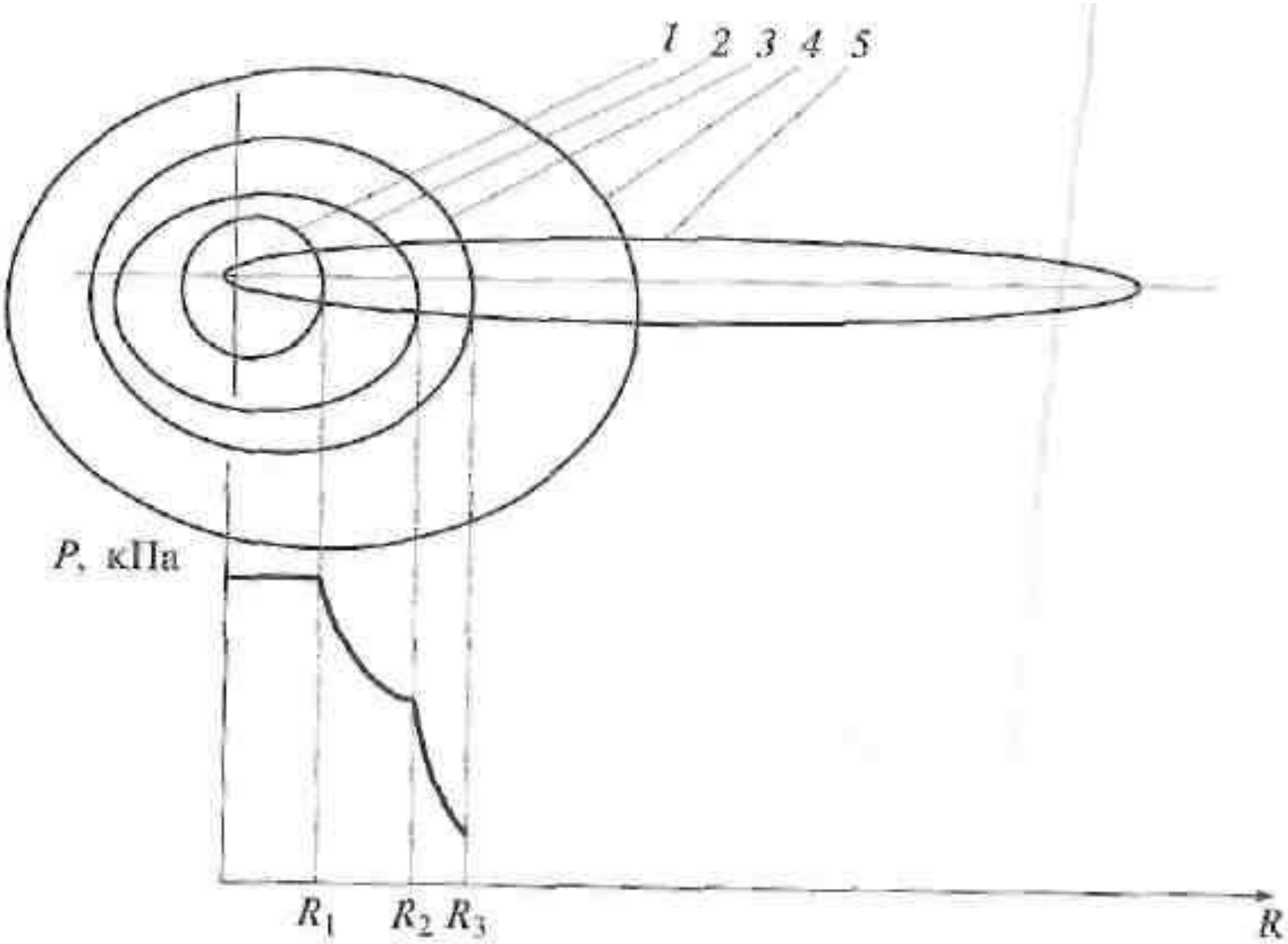

Рисунок. Зоны поражения при взрыве облака газопаровоздушной смеси: *1* — детонационная; *2* — «огненного шара»; *3* — действия ударной волны; *4* — теплового поражения; *5* — токсического воздействия

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

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

где $m^{газ}_{ТНТ}$ — тротиловый эквивалент взрывоопасного газа (пара), кг;

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

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)); $Q_{vгаз}$ — энергия взрыва газа, кДж/кг (см. табл. 3); $Q_{vТНТ}$= 4520 кДж/кг — энергия взрыва тринитротолуола (тротила); $m_{газ}$ — масса горючего газа, кг.

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

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

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

$$\Delta P_{ф2} = 1\,300\left(\frac{R_1}{R_2}\right)^3 + 50.$$

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

$$\Delta P_{ф3} = \frac{233}{\sqrt{1 + 0,41\left(R_3/R_1\right)^3} - 1}.$$

Зная величину избыточного давления на фронте ударной волны на расстоянии R_3 от центра облака газопаровоздушной смеси, по таблице «Давление $\Delta P_ф$, 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 η = 0,6, расчетная масса газа при одиночном хранении составляет 50 % массы газа в резервуаре и $Q_{vмет}$ = 50 * 10^3 кДж/кг (см. табл. 3), кг:

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

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:

$$\Delta P_{ф309,7} = \frac{233}{\sqrt{1 + 0{,}41(309{,}7/138{,}08)^3} - 1} = 168{,}8.$$

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 м^3. 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./км^2. Температура окружающей среды $T_{ос}$.

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	М, кг/кмоль	V_1, м^3	R, м	Тип здания	N, чел.	Р, чел./км^2
1	Аммиак NH_3	15	50	100	Кирпичное	5	500
2	Ацетон C_3H_60	58	75	100	С легким каркасом	6	600
3	Ацетилен c_2H_2	26	100	100	Деревянное	7	500
4	Бутан C_4H_{10}	58	125	100	Кирпичное	8	800
5	Бутадиен C_4H_8	56	150	100	С легким каркасом	9	850
6	Бензол C_6H_6	78	175	100	Деревянное	10	900
7	Бензин	1 94	200	100	Кирпичное	5	500
8	Водород H_2	2	250	100	С легким каркасом	6	600
9	Метан CH_4	1 16	300	100	Деревянное	7	500
10	Нефть $C_{17}H_{38}$	240	1000	100	Кирпичное	8	800
11	Пропан C_3H_8	44	400	100	С легким каркасом	9	850
12	Этилен C_2H_4	28	450	100	Деревянное	10	900
13	Аммиак NH_3	15	500	100	Кирпичное	5	500
14	Ацетон C_3H_6O	58	550	100	С легким каркасом	6	600
15	Ацетилен C_2H_2	26	50	100	Деревянное	7	500
16	Бутан C_4H_{10}	58	100	100	Кирпичное	8	800
17	Бутадиен c_4H_8	56	150	100	С легким каркасом	9	850
18	Бензол C_6H_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,

$$m_г = (V_а + V_т)\rho_г,$$

где $V_а$ — объем газа, вышедшего из аппарата (баллона, резервуара), м^3; $V_Т$ — объем газа, вышедшего из трубопровода, м^3;

$$V_а = 0{,}01 P_1 V_1,$$

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

$$V_т = V_{т1} + V_{т2},$$

$V_{Т1}$ — объем газа, вышедшего из трубопровода до его отключения, м^3;

$V_{Т2}$ — объем газа, вышедшего из трубопровода после его отключения, м^3;

$$V_{т1} = Q\tau,$$

где Q — расход газа, определяемый в соответствии с технологическим регламентом в зависимости от давления в трубопроводе, его диаметра, температуры газа, м^3/с;
τ — время отключения газопровода;

$$V_{т2} = 0,01\pi P_2 \sum r_i^2 L_i,$$

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,

$$m_{п1} = \alpha \frac{\mu}{R} \frac{V_1 P_1 + V_т P_2}{T_ж},$$

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, $V_Т$ и P_2 — то же, что и в формуле (19);

$T_ж$ — температура жидкости в аппаратуре, К.

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

$$m_{п\,исп} = WF_{исп}\tau_{исп},$$

где W — интенсивность испарения жидкости, кг/(м^2*с);

$F_{исп}$ — 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;

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

Интенсивность испарения разлившейся жидкости в помещении, кг/(м^2*с), в рассматриваемом случае определяется по формуле

$$W = 10^{-6}\eta\sqrt{\mu}P_{нас},$$

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

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

Таблица 6. Значения коэффициента *η*

Скорость воздушного потока, м/с	Температура в помещении t, °C				
	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 $\Delta P_{ф}$, кПа, для индивидуальных горючих веществ, состоящих из атомов C, H, O, Cl, Br, F, определяют по формуле

$$\Delta P_{ф} = \frac{100(P_{max} - P_0)mZ}{(1 + A_{ав}\tau_{ав})V_{св}\rho_г c_{ст} K_н},$$

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; $A_{ав}$ — кратность воздухообмена аварийной вентиляции, $ч^{-1}$; $\tau_{ав}$ — время работы аварийной вентиляции, ч; $V_{СВ}$ — свободный объем помещения, куб.м (можно принять равным 80 % помещения); $\rho_г$ — плотность газа (пара) при расчетной температуре, $кг/м^3$; $c_{ст}$ — стехиометрическая концентрация горючего, об. %; $K_н$ — коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатность процессов горения, принимаемый равным 3.

$$c_{ст} = 100/(1 + 4{,}84\beta),$$

где β — стехиометрический коэффициент кислорода в реакции горения, $\beta = n_с + 0{,}25(n_н - n_х) - 0{,}5n_о$ ($n_с$, $n_н$, $n_х$, $n_о$ — число атомов С, Н, О и галогенов в молекуле горючего).

Плотность газа (пара) можно найти по формуле

$$\rho_г = \frac{M}{V_0(1 + 0.00367t_р)},$$

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

$t_р$ — 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 х 12 х 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 м^3/с. Нефть находится в насосе с максимальным объемом заполнения аппарата $V_{ап}$ = 25,76 м^3. Насос занимает площадь 4,6 х 2,8 м.

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

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

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

Рассчитаем объем нефти, поступившей в помещение насосной (с учетом вылива из насоса, м^3:

$$V_{нв} = V_{тр} + V_{нп} = 339,6 + 25,76 = 365,36.$$

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

Учитывая, что площадь помещения составляет $F_{пом}$ = 54 * 12 = 648 м^2,

а насосы занимают площадь $F_{нас}$ = 4 * 4,6 * 2,8 = = 51,52 м^2,

определим величину свободной площади пола, м^2:

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

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

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

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 кПа.
Тогда интенсивность испарения нефти составит [см. формулу (21)], кг/(м^2*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 η = 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 $\rho_{неф}$ = 860 кг/м^3 составляет, кг,

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

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

5. По формуле (24) найдем плотность паров нефти, кг/м^3:

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

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:

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

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, м^3:

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

- молекуляр ует формула $C_{17}H_{38}$ ($n_с$= 17, $n_н$ = 38, β = 17 + 0,25 * 38 = 26,5), а стехиометрическая концентрация паров нефти определяется по формуле (23), об. %:

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

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

7. Поскольку основные строительные конструкции здания насосной являются железобетонными, а $\Delta P_{доп}$ = 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 $\Delta P_{ф}$ =180 кПа, что приведет к полному разрушению здания насосной и гибели персонала.

ЗАДАНИЕ

Насосный зал нефтеперерабатывающего предприятия имеет размеры A x B x H м. В зале расположены центробежные магистральные насосы НМ-1000 x 210. Производительность каждого насоса Q м^3/ч, создаваемое давление P = 2, 1 * 10^5 кПа. Нефть находится в насосе с максимальным объемом заполнения V_{an} м^3. 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 $K_{ав}$ = 10 ч$^{-1}$. Температура нефти равна средней максимальной температуре $t_н$ = 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	A x B x H, м	Q, $м^3/ч$	Количество насосов	V_{an}, $м^3$	r, 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