

2. Расчет параметров волны давления при взрыве резервуара с перегретой жидкостью или сжиженным газом при воздействии на него очага пожара

При пожарах возможны взрывы различных баллонов со сжиженным газом или перегретой жидкостью. Замкнутый резервуар может оказаться в очаге пожара, происходит нагрев его содержимого до температуры, существенно превышающей нормальную температуру кипения, с соответствующим повышением давления. За счет нагрева несмоченных стенок сосуда уменьшается предел прочности их материала, в результате чего при определенных условиях оказывается возможным разрыв резервуара с возникновением волн давления и образованием «огненного шара». Такая авария произошла в городе Томске 30 ноября 2012 г., когда в одной из квартир жилого дома работники строительной организации по изготовлению натяжного потолка разогревали тепловой пушкой баллон со сжиженным газом. Произошел взрыв, вызвавший человеческие жертвы.

Разрыв резервуара в очаге пожара с образованием волн давления получил в мировой практике название *BLEVE* (Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion – взрыв расширяющихся паров вскипающей жидкости).

Возможность возникновения взрыва BLEVE для конкретного вещества, хранящегося в замкнутой емкости, зависит от многих параметров. Методика такого расчета приведена в [1].

На первом этапе расчета определяется возможность возникновения при пожаре взрыва BLEVE, для чего определяется параметр δ по формуле:

$$\delta = \frac{C_p}{Q_{\text{исп}}} (T_{\text{н}} - T_{\text{кип}}), \quad (1)$$

где C_p – удельная теплоемкость жидкости в емкости, кДж/(кг·К); T_H – температура жидкости, соответствующая температуре насыщенного пара при давлении срабатывания установленного предохранительного клапана, К; $T_{\text{кип}}$ – температура кипения жидкости при атмосферном (нормальном) давлении, К; $Q_{\text{исп}}$ – удельная теплота испарения жидкости при температуре кипения $T_{\text{кип}}$, кДж/кг.

Значения теплоты испарения, температуры кипения и удельной теплоемкости среды в жидкой фазе при нормальном давлении приводятся в справочниках, или они могут быть взяты для некоторых веществ по табл. 1.

Если в результате расчета получаем, что $\delta < 0,35$, взрыва BLEVE не происходит. В противном случае, при $\delta \geq 0,35$, вероятность возникновения данного явления велика.

При разрушении стенок сосуда с перегретой жидкостью резко падает давление от давления в сосуде P (или давления срабатывания предохранительного клапана) до атмосферного давления P_0 . В результате происходит адиабатное (изоэнтропическое) расширение среды. Перегретая жидкость начинает резко испаряться с переходом в пар с образованием его большого количества, что вызывает волну давления. Параметрами волны давления, образующейся при взрыве BLEVE, являются избыточное давление ΔP в положительной фазе волны давления и безразмерный импульс i_+ положительной фазы волны. Избыточное давление может быть найдено по формуле

$$\Delta P = P_0 \left(0,8 \frac{M_{\text{ПР}}^{0,33}}{r} + 3 \frac{M_{\text{ПР}}^{0,66}}{r^2} + 5 \frac{M_{\text{ПР}}}{r^3} \right). \quad (2)$$

Таблица 1

Теплофизические свойства веществ при давлении 101,3 кПа

Соединение	Формула	Температура кипения $T_{\text{кип}}$, К	Теплота испарения $Q_{\text{исп}}$, кДж/кг	Удельная теплоемкость жидкой фазы C_p , кДж/(кг·К)	Константы уравнения Антуана		
					A	B	C_A
Ацетальдегид	C_2H_4O	293,3	584	2,180	7,18246	1287,625	161,330
Ацетон	C_3H_6O	329,3	525	2,491	7,25058	1281,721	237,088
Бензол	C_6H_6	353,3	394	1,674	6,98426	1252,776	225,178
Гексан	C_6H_{14}	341,9	332	2,262	6,87024	1166,274	223,661
Гептан	C_7H_{16}	371,6	316	2,180	6,95154	1295,405	219,819
Диэтилэфир	$C_4H_{10}O$	307,7	384	2,320	6,99790	1098,945	232,372
Изобутан	C_4H_{10}	261,5	366	2,240	5,95318	916,054	243,783
Изопентан	C_5H_{12}	300,9	342	1,647	6,79306	1022,551	233,493
Изопропилбензол	C_9H_{12}	370,3	316	1,717	6,93773	1460,668	207,652
Метиловый спирт	CH_4O	337,7	1100	2,547	8,22777	1660,454	245,818
<i>n</i> -Пентан	C_5H_{12}	282,7	315	1,670	6,84715	1062,555	231,805
<i>n</i> -Бутан	C_4H_{10}	272,6	385	2,240	6,00525	968,098	242,555

Окончание табл. 1

Соединение	Формула	Температура кипения $T_{\text{кип}}$, К	Теплота испарения $Q_{\text{исп}}$, кДж/кг	Удельная теплоемкость жидкой фазы C_p , кДж/(кг·К)	Константы уравнения Антуана		
					A	B	C_A
<i>n</i> -Пентан	C_5H_{12}	309,3	357	2,670	5,97208	1062,555	231,805
<i>n</i> -Пропиловый спирт	C_3H_8O	370,3	750	0,766	8,31708	1751,981	225,125
Пропилен	C_3H_6	225,5	438	2,430	5,94852	786,532	247,243
Толуол	C_7H_8	383,6	412	1,138	6,0507	1328,171	217,713
Уксусная кислота	C_2H_4O	391	406	2,010	7,79545	1789,908	245,908
Хлорбензол	C_6H_5Cl	404,8	313	1,221	7,26112	1607,316	235,351
Циклогексан	C_6H_{12}	353	358	1,859	6,64788	1095,531	210,064
Этиловый спирт	C_2H_6O	351,5	840	2,428	8,68665	1918,508	252,125

Импульс волны давления находится через приведенную массу по формуле

$$i_+ = 123 \frac{M_{\text{ПР}}^{0,66}}{r} . \quad (3)$$

Параметр P_0 – атмосферное давление, 101 кПа; r – расстояние до центра взрыва, м.

Приведенную массу жидкой фазы вещества $M_{\text{ПР}}$, кг, в формулах (2) и (3), которая участвует во взрыве, определяют по формуле

$$M_{\text{ПР}} = \frac{Q_A}{Q_0} , \quad (4)$$

где Q_A – тепловая энергия, выделяющаяся при адиабатном расширении жидкости, находящейся в резервуаре, кДж; Q_0 – константа, равная $4,52 \cdot 10^3$ кДж/кг.

Значение выделяющейся при взрыве энергии, кДж, можно рассчитать по формуле

$$Q_A = C_{\text{ЭФ}} M_{\text{Ж}} (T - T_{\text{КИП}}) , \quad (5)$$

где $M_{\text{Ж}}$ – масса жидкости в резервуаре, кг; $C_{\text{ЭФ}}$ – константа, равная 0,5 кДж/(кг·К); T – температура вещества в резервуаре в момент его взрыва, К; $T_{\text{КИП}}$ – температура кипения жидкости при атмосферном давлении, К.

При наличии в резервуаре установленного предохранительного клапана температуру вещества T_H , К, допускается рассчитывать по формуле:

$$T_{\text{H}} = \frac{B}{A - \lg P_{\text{K}}} - C_{\text{A}} + 273,15, \quad (6)$$

где A, B, C_{A} – константы уравнения Антуана для данного вещества, которые приведены в табл. 1; P_{K} – давление срабатывания предохранительного клапана, кПа. Константа A должна соответствовать давлению, выраженному в кПа.

Пример. При пожаре в цехе в зоне очага горения оказался баллон, в котором находилось 24 кг бензола. В результате нагрева оболочка баллона не выдержала и разрушилась. Бензол испарился, и его пары взорвались. Температура паров бензола в момент взрыва составила 500 К.

Определить, относится ли данный взрыв к взрыву BLEVE? Какое избыточное давление в положительной фазе волны давления создается на расстоянии 10 м от баллона?

Решение. Определим, относится ли данный взрыв к взрыву BLEVE, для чего найдем параметр δ по формуле (1):

$$\delta = \frac{C_{\text{p}}}{Q_{\text{исп}}} (T_{\text{H}} - T_{\text{кип}}) = \frac{1,674}{394} (500 - 353,3) = 0,623,$$

где $C_{\text{p}} = 1,674$ кДж/(кг·К), $T_{\text{кип}} = 353,3$ К и $Q_{\text{исп}} = 394$ кДж/кг взяты по табл. 1 для бензола при атмосферном давлении.

Так как параметр $\delta = 0,623 > 0,35$, то произойдет взрыв BLEVE.

Определим значение энергии, кДж, выделяющейся при взрыве, по формуле (5):

$$Q_{\text{A}} = 0,5 \cdot 24 (500 - 353,3) = 1766,$$

где принято в соответствии с исходными данными и рекомендациями, приведенными выше: $M_{\text{ж}} = 24$ кг; $C_{\text{эф}} = 0,5$ кДж/(кг·К); $T = 500$ К.

Приведенную массу участвующего во взрыве бензола, кг, определим по формуле (4):

$$M_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{А}}}{Q_{\text{о}}} = \frac{1766}{4520} = 0,391.$$

Найдем по формуле (2) избыточное давление в положительной фазе волны давления, кПа, которое создается на расстоянии 10 м от баллона в момент его взрыва:

$$\Delta P = 101,3 \left(0,8 \frac{0,391^{0,33}}{10} + 3 \frac{0,391^{0,66}}{10^2} + 5 \frac{0,391}{10^3} \right) = 7,78.$$

Задание для самостоятельной работы

Рассчитать избыточное давление и импульс положительной фазы волны давления при пожаре и нагреве цистерны со сжатым углеводородным соединением, если сработает предохранительный клапан. Связан ли этот взрыв с развитием взрыва BLEVE? В цистерне находится углеводородное соединение в жидкой фазе массой $M_{\text{ж}}$ при температуре 293 К. Давление срабатывания клапана $P_{\text{к}}$ равно 2,0 МПа.

К каким разрушениям, в соответствии с табл. 3, приведет данный взрыв, если расстояние от эпицентра взрыва до объекта составляет r .

Решение задачи выполнить для своего варианта в соответствии с табл. 2. Сделать выводы по задаче.

Таблица 2

Исходные данные для решения задания

№ варианта	Горючая жидкость	Масса жидкости в цистерне $M_{ж}$, кг	Расстояние R , м	Давление срабатывания клапана P_k , МПа
1	Ацетальдегид	1000	20	5
2	Ацетон	1500	25	4,5
3	Бензол	2000	30	4
4	Гексан	2500	35	3,5
5	Гептан	3000	40	3
6	Диэтилэфир	3500	45	2,5
7	Изобутан	4000	50	2
8	Изопентан	4500	40	5
9	Изопропилбензол	5000	45	4,5
10	Метилловый спирт	5500	55	4
11	<i>n</i> -Пентан	6000	60	3,5
12	<i>n</i> -Бутан	6500	55	3
13	<i>n</i> -Пентан	7000	40	2,5
14	<i>n</i> -Пропиловый спирт	7500	45	2
15	Пропилен	8000	50	5
16	Толуол	8500	40	4,5
17	Уксусная кислота	9000	45	4
18	Хлорбензол	9500	55	3,5
19	Циклогексан	10000	40	3
20	Этиловый спирт	10500	45	2,5
21	Бензол	11000	40	2
22	Изопентан	11500	45	5
23	Ацетон	12000	50	4,5
24	Пропилен	12500	55	4
25	Циклогексан	13000	60	3,5

Таблица 3 – Типичные предельно допустимые значения избыточного давления с точки зрения повреждения зданий

Степень поражения	Типичные предельно допустимые значения избыточного давления, кПа
Полное разрушение зданий	100
50 %-ное разрушение зданий	53
Средние повреждения зданий	28
Умеренные повреждения зданий (повреждение внутренних перегородок, рам, дверей и т. п.)	12
Нижний порог повреждения человека волной давления	5
Малые повреждения (разбита часть остекления)	3