

09, сентябрь 2015

УДК 614.838.001

Параметры ударной волны при взрыве газовой смеси сжиженных углеводородов

Богданович А.Б., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Ракетные двигатели»*

Научный руководитель: Синицын В.В., к.в.н., профессор

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
доцент кафедры «Экология и промышленная безопасность»*

vitasin@bmstu.ru

В настоящее время сжиженные углеводородные газы (СУГ) заняли прочное место в обеспечении отдельных потребителей и регионов топливом и сырьём. Предназначенные изначально исключительно для бытовых целей, сжиженные газы в настоящее время являются топливом с очень широким диапазоном применения: отопление бытовых и коммунальных помещений, сушка, резка и сварка металлов, топливо для двигателей внутреннего сгорания тракторов, автомобилей и даже самолётов. Углеводородные газы широко используются в химической промышленности как исходное сырьё для производства растворителей, глицерина, акрилонитрила, поверхностно-активных веществ, полимеров и др. Свойства углеводородных газов (теплотехнические, экологические и экономические) превращают их в идеальный продукт для энергоснабжения в современном мире. Газ, по сравнению с другими видами органического топлива, наиболее экологически чистый вид, т.к. совокупный выброс загрязняющих веществ на единицу полезного использования энергии у газа существенно ниже, чем у других топлив.

Большая потребность в углеводородных газах и их незначительная плотность в нормальных условиях обусловили необходимость сжижения газов с целью снижения их объёма при транспортировке и хранении. Хранят и транспортируют СУГ в жидком виде под давлением, которое создаётся собственными парами газа. Находящиеся в сжиженном состоянии СУГ представляют собой перегретые жидкости, которые при разгерметизации резервуара начинают бурно испаряться. При этом резко возрастает давление паров СУГ, что может привести к разрушению резервуара.

Последствия взрывов различных углеводородов напрямую зависит от теплоты сгорания конкретно взятого вещества, т.е. чем теплота сгорания углеводорода выше, тем больше масса тротилового эквивалента (при выбранной массе хранящегося вещества), и, соответственно, последствия взрыва нанесут повреждения большей степени тяжести.

Рост числа автомобилей, работающих на СУГ, стремительное увеличение сети авто газозаправочных станций (АГЗС) и объёмов автомобильных перевозок СУГ определили необходимость оценить возможные последствия чрезвычайной ситуации – разрушения цистерны и взрыва содержащихся в ней СУГ.

Формулы для определения значений параметров ударной волны на расстояниях, превышающих радиус полусферы газового облака в окружающем воздухе, получены путем аппроксимации численного решения задачи о детонации пропановоздушной смеси, выполненной Б.Е. Гельфандом. Решение выполнено интегрированием системы нестационарных уравнений газовой динамики в сферических координатах в переменных Лагранжа и позволяет получать результаты, удовлетворительно согласующиеся с экспериментальными данными для горючих смесей различных углеводородов с воздухом.

Максимальное избыточное давление во фронте ударной волны (КПа):

$$\Delta P_{\phi} = P_0 \bar{P} \quad (1)$$

$$\lg \bar{P} = 0,65 - 2,18 \lg \bar{R} + 0,52 (\lg \bar{R})^2 \quad (2)$$

$$\bar{R} = R / \sqrt[3]{M_T}, \quad (3)$$

где M_T - тротилловый эквивалент наземного взрыва полусферического облака ГВС (кг);

P_0 - атмосферное давление, равное 100 КПа;

R – расстояние от центра взрыва до объекта, м;

$\bar{R}$ - приведенный радиус взрыва.

Удельный импульс (Пас):

$$I = \bar{I} \sqrt[3]{M_T} \quad (4)$$

$$\lg \bar{I} = 2,11 - 0,97 + 0,44 (\lg \bar{R})^2. \quad (5)$$

Тротилловый эквивалент (кг) определяется из соотношения (6), в котором предполагается, что энергия взрыва полусферического облака полностью отражена поверхностью, над которой это облако образовалось.

$$M_T = 2M_B Q / Q_T, \quad (6)$$

где M_B - масса вещества, взрывающегося в составе облака ГВС (кг);

Q - теплота, выделяющаяся при сгорании данного вещества (кДж/кг);

Q_T - теплота взрыва тротила (4520 кДж/кг).

Значение M_B определяется соотношением:

$$M_B = \delta M_{xp}, \quad (7)$$

где M_{xp} - масса вещества, находившегося в хранилище до аварии (до взрыва);

δ - коэффициент, показывающий долю вещества, переходящую при аварии в газ, зависящий от способа хранения вещества. Для сжиженных углеводородных газов, хранящихся под давлением, $\delta = 0,5$.

Теплота, выделяющаяся при сгорании, представляет собой табличную величину, которая показывает количество энергии, выделяющейся при взрыве (сгорании) единицы массы углеводорода. Для исследования последствий взрыва выбраны 5 углеводородов [1]. Основные физико-химические характеристики углеводородов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Выбранные углеводороды

Вещество	Химическая формула	Теплота сгорания Q , кДж/кг	Коэффициент приведения к тротилу Q/Q_T
Бутан	C_4H_{10}	45800	10,1
Бутадиен	C_4H_8	47000	10,4
Метан	CH_4	50000	11,1
Пропан	C_3H_8	46400	10,3
Этилен	C_2H_4	47000	10,4

Объёмы цистерн, используемых для автомобильных перевозок и хранения газа на АГЗС, составляют от 8 до 12 кубометров. Исходя из этого, исследования проводились для массы СУГ 10 тонн на расстояниях от места взрыва от 80 до 150 метров. Результаты расчётов с округлением до целых, представлены в таблицах 2 - 3.

Таблица 2

Максимальное избыточное давление ΔP_{ϕ} во фронте ударной волны при взрыве 10 т различных СУГ, кПа

Расстояние от центра взрыва, м	Бутан	Бутадиен	Метан	Пропан	Этилен
80	147	149	155	148	149
90	117	119	124	118	119
100	96	98	102	97	98

110	81	82	86	82	82
120	70	71	71	70	71
130	61	61	64	61	61
140	53	54	56	54	54
150	48	48	50	48	48

Таблица 3

Удельный импульс I, Пас воздушной ударной волны
при взрыве 10 т различных СУГ

Расстояние от центра взрыва, м	Бутан	Бутадиен	Метан	Пропан	Этилен
80	3761	3763	3846	3773	3769
90	3447	3448	3520	34457	3454
100	3202	3204	3267	3211	3208
110	3007	3008	3064	3015	3012
120	2848	2849	2899	2855	2853
130	2715	2717	2762	2722	2720
140	2604	2606	2647	2611	2608
150	2510	2510	2549	2515	2513

Результаты расчётов показывают незначительный разброс исследуемых величин – избыточного давления во фронте ударной волны и удельного импульса для различных углеводородов на одинаковом расстоянии от места взрыва. Величины математического ожидания, дисперсии и среднего квадратичного отклонения представлены в таблице 4.

Таблица 4

Математическое ожидание, дисперсии и среднее квадратичное отклонение
избыточного давления во фронте ударной волны для различных СУГ, кПа

Расстояние, м	Математическое ожидание	Дисперсия	Среднее квадратичное отклонение
80	149.2	10,5	3,24
90	119,1	6,3	2,52

100	97.9	4, 1	2,01
110	82,3	2,7	1,65
120	70.5	1,9	1,39
130	61,4	1,4	1,18
140	54,1	1,0	1,02
150	48,2	0,8	0,89

Результаты исследований позволили выбрать пропан как «эталон» СУГ для выполнения оперативных расчётов при оценке возможных последствий взрыва.

Абсолютное значение отклонения (ошибки) величины избыточного давления во фронте ударной волны при взрыве пропана от математического ожидания избыточного давления составляют от 0,63 – 0.535 % (таблица 5).

Таблица 5

Математическое ожидание, давление во фронте ударной волны, отклонение

R , м	$M(R)$, кПа	$\Delta P_{\phi}(R)$ пропан, кПа	$ \Delta $, %
80	149.2	148	0,63
90	119,1	118	0,612
100	97.9	97	0,596
110	82,3	82	0,581
120	70.5	70	0,568
130	61,4	61	0,556
140	54,1	54	0,545
150	48,2	48	0,535

Результаты расчётов по взрывам различной мощности и сравнение их с табличными данными о воздействии избыточного давления на объекты и людей [3] показывают, что даже при взрыве 1 т хранящегося углеводорода возможны сильные разрушения кирпичных зданий производственного типа на удалении не менее 80 м от места взрыва. Избыточное давление во фронте ударной волны полностью выводит объект из строя без возможности его восстановления. При взрыве 12 т хранящегося углеводорода расстояние сильных разрушений превышает 200 метров. С учётом изложенного выполнены расчёты для избыточного давления во фронте ударной волны при изменении

массы эталонного углеводорода (пропана) от 1 до 12 тонн на расстояниях от 80 до 200 метров (таблица 6).

Таблица 6

Избыточное давление во фронте ударной волны, кПа

Масса ГВС, т	Расстояние от центра взрыва, м												
	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
1	38,3	31,8	27,1	23,6	20,8	18,6	16,8	15,4	14,2	13,1	12,2	11,4	10,8
2	55,9	45,9	38,7	33,3	29,2	25,9	23,2	21,1	19,2	17,7	16,4	15,3	14,3
3	70,6	57,6	48,3	41,3	36,0	31,7	28,4	25,6	23,3	21,4	19,7	18,3	17,1
4	83,8	67,9	56,7	48,3	41,9	36,9	32,8	29,5	26,8	24,5	22,6	20,9	19,5
5	95,9	77,5	64,4	54,7	47,3	41,5	36,9	33,1	30,0	27,4	25,1	23,2	21,6
6	107	86,4	71,6	60,7	52,3	45,8	40,6	36,4	32,9	29,9	27,5	25,3	23,5
7	118	94,9	78,4	66,3	57,1	49,9	44,1	39,5	35,6	32,4	29,7	27,4	25,4
8	128, 51	103	84,9	71,7	61,6	53,7	47,5	42,4	38,2	34,7	31,8	29,3	27,1
9	138	110	91,2	76,8	65,9	57,4	50,7	45,2	40,7	36,9	33,8	31,1	28,7
10	148	118	97,2	81,8	70,1	61,0	53,7	47,9	43,1	39,1	35,7	32,8	30,3
11	157	125	103	86,6	74,1	64,4	56,7	50,5	45,4	41,1	37,5	34,5	31,8
12	166	132	108	91,3	78,1	67,8	59,6	53,1	47,6	43,1	39,3	36,1	33,3

Полученные в ходе исследований результаты позволили выбрать в качестве эталонного СУГ пропан. И в дальнейшем проводить расчёты относительно эталонного СУГ для определения избыточного давления во фронте ударной волны и удельного импульса в зависимости от расстояния до центра взрыва.

Предлагаемый подход к оценке основных параметров воздушной ударной волны в зависимости от массы СУГ и расстояния до центра взрыва позволяет оперативно принимать решения на требуемый наряд сил и средств для ликвидации последствий непреднамеренных взрывов.

Список литературы

1. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. М.: Химия, 1991, 432 с.
2. ПБ 13-407-01 Единые правила при взрывных работах. Введ. 2002-01-03. М.: НПО ОБТ, 2002, 214 с.
3. Богданович А.Б. Безопасные расстояния при хранении углеводородов // Студенческий научный вестник. Сборник статей, докладов участников общеуниверситетской научно-технической конференции «Студенческая научная весна - 2012», посвящённой 165-летию Н.Е. Жуковского. Т. XII. В 5 ч. Ч. 3. С.322 – 326.