

ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ВЗРЫВЕ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Аналитически определены основные параметры воздушной ударной волны при взрыве газозвушной смеси в зависимости от её массы и расстояния от места взрыва. Обосновано предложение о выборе эталонного углеводорода для оперативной оценки последствий возможных разрушений при взрыве.

Ключевые слова: сжиженные углеводородные газы, газозвушная смесь, взрыв, фронт ударной волны.

A.B. Bogdanovich, A.A. Kirsanov, V.V. Sinitsin, V.V. Tatarinov

RAPID ASSESSMENT OF THE SHOCK WAVE PARAMETERS AT EXPLOSION OF GAS-AIR MIXTURE

The main parameters of air shock wave at explosion of gas-air mixture depending on its mass and the distance from the explosion site are analytically determined. The proposal about the selection of the reference hydrocarbon for the operational assessing of the possible destruction in case of explosion is justified.

Key words: liquefied hydrocarbon gases, gas-air mixture, explosion, the shock wave front.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 21 марта 2016 г.

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, так как 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.

Рост числа автомобилей, работающих на СУГ, стремительное увеличение сети *автогазозаправочных станций (АГЗС)* и объёмов автомобильных перевозок СУГ определили необходимость оценки возможных последствий разрушения цистерны и последующего взрыва содержащегося в ней газа.

Последствия взрывов различных углеводородов напрямую зависят от теплоты сгорания конкретно взятого вещества, то есть чем выше теплота сгорания выбранной массы хранящегося углеводорода, тем больше масса в тротиловом эквиваленте (табл. 1) и, соответственно, последствия взрыва нанесут повреждения большей степени тяжести.

Таблица 1

Энергетические характеристики некоторых углеводородов

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

Тротиловый эквивалент ($кг$) определяется из соотношения [1], в котором предполагается, что энергия взрыва полусферического облака полностью отражена поверхностью, над которой это облако образовалось:

$$M_T = 2M_B Q / Q_T,$$

где M_T – тротиловый эквивалент наземного взрыва полусферического облака *газовоздушной смеси (ГВС)*, кг;

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:

$$M_B = \delta M_{XP},$$

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

δ – коэффициент, показывающий долю вещества, переходящую при аварии в газ. Для СУГ, хранящихся под давлением, $\delta = 0,5$.

Формулы для определения параметров ударной волны на расстояниях, превышающих радиус полусферы газового облака в окружающем воздухе, получены путём аппроксимации численного решения задачи о детонации пропан-воздушной 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 [1].

Максимальное избыточное давление во фронте ударной волны (*кПа*):

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

где \bar{R} – приведённый радиус взрыва.

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

где R – расстояние от центра взрыва до объекта, *м*.

$$\Delta P_\phi = P_0 \bar{P},$$

где P_0 – атмосферное давление, равное 100 *кПа*;

Удельный импульс (*Па*):

$$I = \bar{I} \sqrt[3]{M_T};$$

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

Объёмы цистерн, используемых для автомобильных перевозок и хранения газа на АГЗС, составляют от 8 до 12 *м³*. Исходя из этого, исследования проводились для массы СУГ 10 *тонн* на расстояниях от места взрыва от 80 до 150 *м*. Результаты расчётов с округлением до целых, представлены в табл. 2, 3 и на рис. 1.

Таблица 2

Избыточное давление ΔP_ϕ во фронте ударной волны при взрыве 10 тонн различных СУГ, *кПа*

Расстояние от центра взрыва, <i>м</i>	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 воздушной ударной волны при взрыве 10 тонн различных СУГ, *Па·с*

Расстояние от центра взрыва, <i>м</i>	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

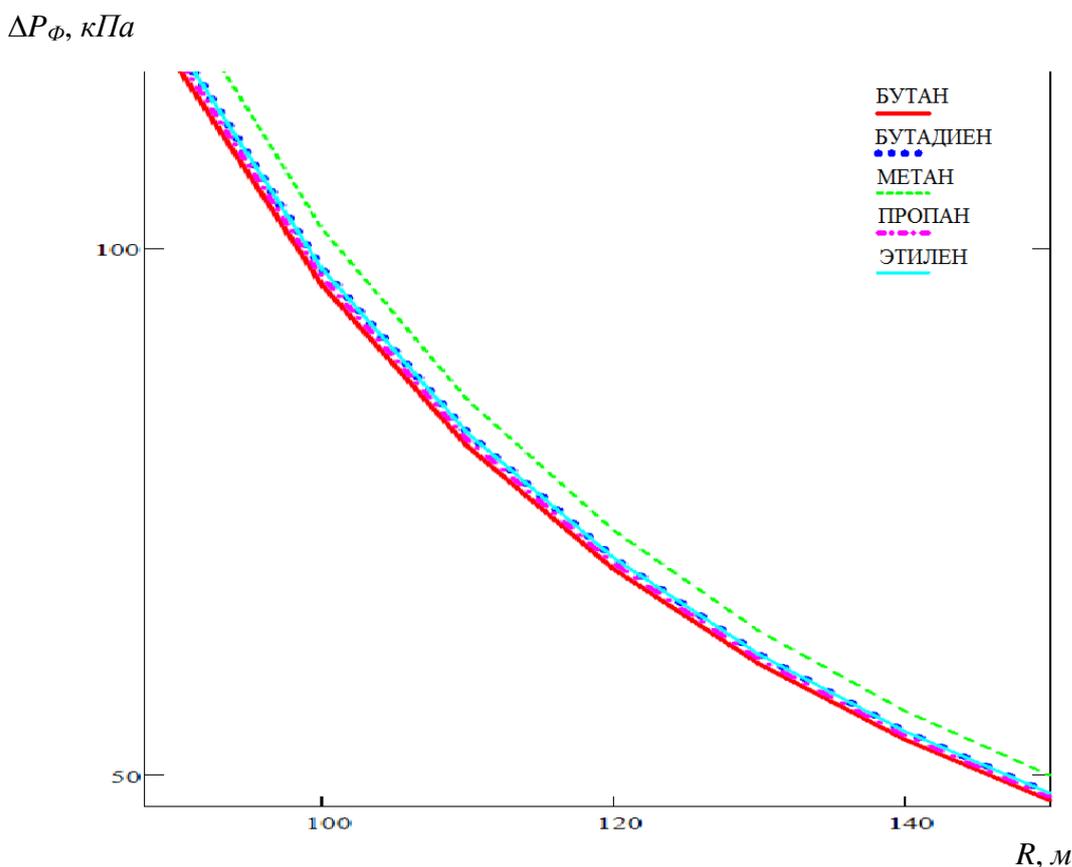


Рис. 1. Избыточное давление во фронте ударной волны при взрыве 10 тонн различных газов.

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. Значения математического ожидания, дисперсии и среднеквадратичного отклонения представлены в табл. 4.

Таблица 4

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

Расстояние, м	Математическое ожидание	Дисперсия	Среднеквадратичное 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.

Результаты расчётов по взрывам различной мощности и сравнение их с табличными данными о воздействии избыточного давления на объекты и людей [1-3] показывают, что даже при взрыве 1 *тонн* 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 *тонн* хранящегося углеводорода расстояние сильных разрушений превышает 200 м.

С учётом изложенного по методике Гельфанда выполнены расчёты избыточного давления во фронте ударной волны при изменении массы эталонного углеводорода (пропана) от 1 до 12 *тонн* на расстояниях от 100 до 200 м (табл. 5).

Таблица 5

Избыточное давление во фронте ударной волны, кПа

Масса ГВС, тонн	Расстояние от центра взрыва, м										
	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
1	27,1	23,6	20,8	18,6	16,8	15,4	14,2	13,1	12,2	11,4	10,8
2	38,7	33,3	29,2	25,9	23,2	21,1	19,2	17,7	16,4	15,3	14,3
3	48,3	41,3	36,0	31,7	28,4	25,6	23,3	21,4	19,7	18,3	17,1
4	56,7	48,3	41,9	36,9	32,8	29,5	26,8	24,5	22,6	20,9	19,5
5	64,4	54,7	47,3	41,5	36,9	33,1	30,0	27,4	25,1	23,2	21,6
6	71,6	60,7	52,3	45,8	40,6	36,4	32,9	29,9	27,5	25,3	23,5
7	78,4	66,3	57,1	49,9	44,1	39,5	35,6	32,4	29,7	27,4	25,4
8	84,9	71,7	61,6	53,7	47,5	42,4	38,2	34,7	31,8	29,3	27,1
9	91,2	76,8	65,9	57,4	50,7	45,2	40,7	36,9	33,8	31,1	28,7
10	97,2	81,8	70,1	61,0	53,7	47,9	43,1	39,1	35,7	32,8	30,3
11	103	86,6	74,1	64,4	56,7	50,5	45,4	41,1	37,5	34,5	31,8
12	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.

Литература

1. *Гельфанд Б.Е., Губин С.А., Михалкин В.Н., Шаргатов В.А.* Расчёт параметров ударных волн при детонации горючих газообразных смесей переменного состава. М.: Физика горения и взрыва, 1985. С. 92-97.
2. *Бесчастнов М.В.* Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. М.: Химия, 1991. 432 с.
3. *ПБ 13-407-01.* Единые правила при взрывных работах. Введ. 2002-01-03. М.: НПО ОБТ, 2002. 214 с.