

УДК 614.8

ФАКТОРЫ ПОРАЖЕНИЯ ПРИ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ГАЗОВЫХ МАГИСТРАЛЕЙ

С. В. Шилов

В работе проведен сравнительный анализ нескольких методик и предложена модель расчета факторов поражения при взрыве облака метана. Модель взрыва позволяет учесть характер застройки местности и определить возможные зоны поражения около газопровода.

Ключевые слова: *газовая магистраль, взрыв, поражающие факторы, ударная волна, импульс волны, зона поражения.*

Газовая промышленность России — крупнейший элемент мировой системы энергообеспечения. Россия занимает первое место в мире по добыче, разведанным запасам и прогнозируемым ресурсам газа и обеспечивает около 21,5 % его мирового производства. Россия — крупнейший в мире экспортер природного газа, формирующий значительную долю мирового газового экспорта [2].

В нашей стране создана одна из самых протяженных сетей газоснабжения. С одной стороны, это обусловлено масштабами территории, с другой — преимуществами газового топлива — его экологичностью при сгорании и высокой выделяемой теплотой.

В то же время метан представляет большую опасность при авариях на газопроводе, как при пожарах, так и взрывах. Безусловно заблаговременно можно предпринять ряд мер и снизить вероятность возникновения опасных ситуаций и их последствия. В то же время отдельная и важная задача — просчитать поражающие параметры при взрывах на газопроводе. Для этого требуется учет различных внешних факторов. Влияние оказывают также параметры разгерметизации самого газопровода (перфорация и ее расположение на газопроводе, гильотинный разрыв).

Природный газ — полезное ископаемое группы осадочных горных пород, которое являет собой смесь газов. Этот ресурс возник в результате разложения органических веществ в недрах Земли. Экологи признают природный газ самым чистым видом органического топлива [2].

Характеристика природного газа зависит от его состава. Он легче воздуха в 1,8 раза, температура самовозгорания 650°C. Сухой газ имеет плотность от 0,68 кг/м³ до 0,85 кг/м³ [4]. Смесь газа с воздухом от 5 % до 15 % объёма является взрывоопасной [1]. Удельная теплота сгорания от 8–12 квт·ч/м³. При использовании природного газа в двигателях внутреннего сгорания октановое число меняется от 110 до 130 [4].

Большая часть природного газа — это смесь газоподобных углеводородов. Основную часть составляет метан CH₄ (до 98 %), а также тяжелые углеводороды — этан C₂H₆, пропан C₃H₈, бутан C₄H₁₀. В состав входят и другие неуглеродные вещества: водород H₂, сероводород H₂S, диоксид углерода CO₂, азот N₂, гелий He. Состав природного газа различается в зависимости от месторождений. На рис. 1 представлен состав природного газа Вуктыльского месторождения [6].

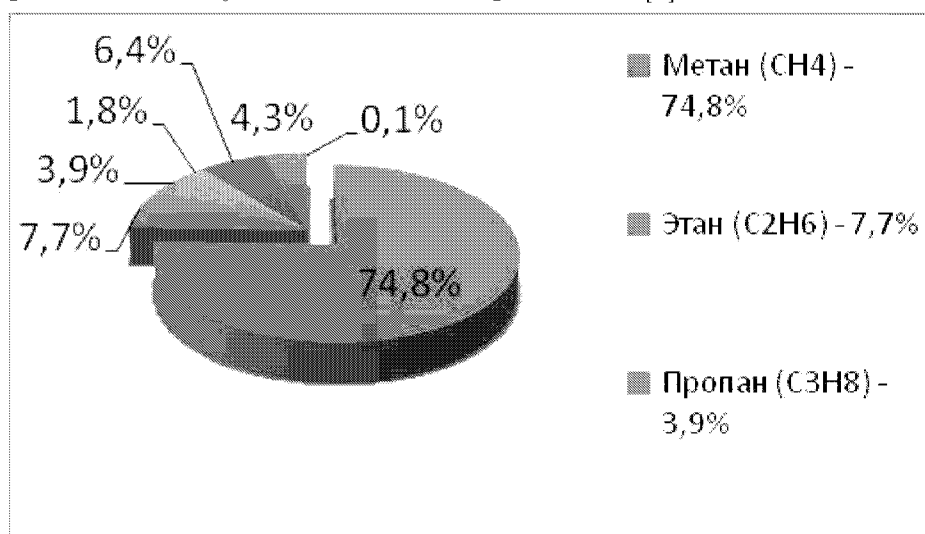


Рис.1. Состав природного газа Вуктыльского месторождения

Газопроводы классифицируют по давлению газа, назначению, месту прокладки, материалу труб. В зависимости от максимального давления газа городские газопроводы разделяют на группы (см. табл. 1) [7].

Газопроводы среднего и высокого (II категории) давления служат для питания городских распределительных сетей низкого и среднего давления через газорегуляторные пункты (далее — ГРП). Они также

подают газ через ГРП в газопроводы промышленных и коммунальных предприятий. По действующим нормам максимальное давление для промышленных предприятий, а также для расположенных в отдельно стоящих зданиях отопительных и производственных котельных, коммунальных и сельскохозяйственных предприятий допускается до 0,6 МПа. Давление 1,2 МПа используется только в крупных городах [7].

Таблица 1

Классификация газопроводов по давлению

Газопроводы		Вид транспортируемого газа	Рабочее давление в газопроводе, МПа
Высокого давления	I категории	Природный газ	0,6–1,2
		СУГ*	0,6–1,6
	II категории	Природный газ и СУГ	0,3–0,6
Среднего давления		Природный газ и СУГ	0,005–0,3
Низкого давления		Природный газ и СУГ	≤0,005

СУГ* — сжиженный углеводородный (природный) газ.

Расчет параметров взрыва газозвушной смеси (ГВС) строится в предположении, что образуются обычно две или три зоны — зона детонации, зона действия продуктов сгорания и зона действия ударной волны [3, 9]. Зона детонации с радиусом R_0 — это зона наибольшего давления с величиной примерно 1,7 МПа в месте расположения облака ГВС. На расстояниях, превышающих R_0 (или $1,7 R_0$), давление волны спадает по некоторому закону.

Так, согласно [9] при взрыве в режиме детонации стехиометрической ГВС избыточное давление во фронте волны в разных зонах можно найти по следующим формулам:

$$\left\{ \begin{array}{ll} P_{\partial} = 1750, \text{ кПа} & \text{при } 0 < R < R_0 \\ \Delta P_{\Phi} = 1300 \cdot \left[\frac{R_0}{R} \right]^3 + 50, \text{ кПа} & \text{при } R_0 < R < 1,7R_0 \\ \Delta P_{\Phi} = \frac{230}{\sqrt{1 + 0,41 \cdot \left[\frac{R_0}{R} \right]^3 - 1}}, \text{ кПа} & \text{при } R > 1,7R_0 \end{array} \right. \quad (1)$$

В методиках [3, 9] не учитывается характер местности, в которой расположен газопровод — то есть предполагается просто открытое пространство. Вместе с тем известно, что за счет турбулизации потока местность оказывает существенное влияние на параметры взрывной волны [5]. В городской черте газопроводы проложены именно в застроенных различными объектами участках. В данной работе показана возможность расчета параметров взрывной волны при аварии на газопроводе на основе методики РД 03–409–01 [5]. В качестве примера взят газопровод высокого давления (600 кПа), использующийся для питания котельной, расположенной на окраине города.

Для газопровода определенную трудность представляет нахождение массы газа в облаке ГВС при утечке. Для этого мы предлагаем использовать массовый секундный расход газа M , кг/с по формуле [3]:

$$M = Y \cdot F \cdot \mu \cdot \sqrt{\frac{P_{\Gamma}}{V_{\Gamma}}}, \quad (2)$$

где Y — коэффициент, учитывающий расход газа от состояния потока (для звуковой скорости истечения $Y = 0,7$);

F — площадь отверстия истечения, принимаемая равной площади сечения трубопровода, м²;

$$F = 3,1415 \cdot \frac{d^2}{4}, \quad (3)$$

μ — коэффициент расхода, учитывающий форму отверстия ($m = 0,7 \dots 0,9$), в расчетах принимается $m = 0,8$;

P_{Γ} — давление газа в газопроводе, Па;

V_{Γ} — удельный объем транспортируемого газа, м³/кг:

$$V_{\Gamma} = R_0 \cdot \frac{T + t}{P_{\Gamma}}, \quad (4)$$

где $R_0 = 273$, К;

t — температура транспортируемого газа, С;

R_0 — удельная газовая постоянная, определяемая по данным долевого состава газа q_k и молярным массам компонентов смеси из соотношения

$$R_0 = 8314 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{q_k}{m_k}, \quad \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad (5)$$

где 8314 — универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К);

m_k — молярная масса компонентов, кг/кмоль.

Приведем пример расчета, используя конкретные значения. Примем диаметр трубы равным 219 мм, давление 600 кПа, тип разрыва — перфорация (как наиболее вероятный), $Y = 0,7$, $t = 20^\circ\text{C}$. Получаем, что при составе газа, соответствующего Вуктыльскому месторождению [6], $M \approx 35$ кг/с.

Далее учитываем время выхода газа из отверстия. Согласно [8], время истечения принимается 300 с при ручном закрытии участка (что происходит наиболее часто) либо согласно параметрам автоматической запорной арматуры. Примем время отключения равным 300 с.

Масса газа, участвующего во взрыве может быть найдена как

$$M_{\Gamma} = M \cdot 300 \cdot 0,1. \quad (6)$$

Коэффициент 0,1 введен как доля горючего вещества, участвующего во взрыве. Известно, что большая часть газа обычно сгорает [9]. Масса газа в облаке при наших параметрах составит $M_{\Gamma} \approx 1050$ кг.

По таблице 1 [5] метан по взрывоопасным свойствам относится к 4 классу (слабочувствительные вещества). Далее, согласно методике, возьмем характер окружающей территории как среднезагроможденное пространство. Затем по экспертной таблице 2 [5] определим режим взрывного превращения как 5-го типа, и его дефлаграционная скорость составит

$$V_{\Gamma} = k_1 M_{\Gamma}^{1/6} = 43 * 1050^{1/6} \approx 137 \text{ м/с.}$$

Эффективный энергозапас облака ГВС можно найти из соотношения:

$$E = M_2 \cdot q_2 \text{ при } C_2 \leq C_{cm}, \quad (7)$$

где q_2 — теплота сгорания метана согласно [5]. Поскольку концентрация метана C_2 в облаке неизвестна, согласно методике принимаем ее равной нижнему концентрационному пределу воспламенения, что меньше стехиометрической концентрации C_{cm} . В итоге получаем: $E = 1050 \cdot 50,16 \cdot 10^6 \approx 53 \cdot 10^9$ Дж.

Расчет избыточного давления при взрыве ведется далее через безразмерное расстояние $R_x = R/(E/P_0)^{1/3}$, где P_0 — атмосферное давление. Так, например, на расстоянии $R = 30$ м получаем $R_x = 0,37$.

Следующим этапом определим безразмерное давление R_x и безразмерный импульс фазы сжатия I_x , используя соотношения:

$$P_{x1} = \left(\frac{V_{\Gamma}}{C_0} \right)^2 \cdot \left(\left(\frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \cdot \left(\frac{0,83}{R_x} - \frac{0,14}{R_x^2} \right) \right); \quad (8)$$

$$I_{x1} = \left(\frac{V_{\Gamma}}{C_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{\sigma - 1}{\sigma}\right) \cdot \left(1 - 0,4 \cdot (\sigma - 1) \cdot \frac{V_{\Gamma}}{\sigma \cdot C_0}\right) \cdot \left(\frac{0,06}{R_x} + \frac{0,01}{R_x^2} - \frac{0,0025}{R_x^3}\right), \quad (9)$$

где $\sigma = 7$ коэффициент расширения продуктов сгорания, C_0 — скорость звука в воздухе в м/с, V_{Γ} — дефлаграционная скорость. Далее находим P_{x2} и I_{x2} :

$$\ln(P_{x2}) = -1,124 - 1,66 \cdot \ln R_x + 0,26 \cdot (\ln R_x)^2, \quad (10)$$

$$\ln(I_{x2}) = -3,4217 - 0,898 \cdot \ln R_x - 0,0096 \cdot (\ln R_x)^2 \quad (11).$$

Окончательные значения P_x и I_x выбираются из условий

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2}); \quad (12)$$

$$I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}). \quad (13)$$

После определения безразмерных величин вычисляются соответствующие им размерные величины

$$\Delta P = P_x \cdot P_0; \quad (14)$$

$$I = I_x \cdot (P_0)^{2/3} E^{1/3} / C_0. \quad (15)$$

С учетом наших значений получаем $P_{x1} = 0,18$, $P_{x2} = 2,16$, $I_{x1} = 0,023$, $I_{x2} = 0,079$. В итоге на расстоянии 30 м избыточное давление при взрыве составит $\Delta P = 18,2$ кПа, а импульс — $I = 0,58$ кПа·с.

Используя изложенную последовательность расчетов по данной методике, можно определить давление и импульс на других расстояниях от газопровода. В дополнение к вышеизложенному возможен расчет других параметров волны, таких как длительность фаз сжатия и разрежения, импульс фаз сжатия и разрежения, форма падающей волны и ее декремент затухания [5].

По окончании вычислений возникает вопрос об оценке поражающего действия ударной волны на людей, здания и другие объекты городской инфраструктуры.

Наиболее точно этот вопрос может быть решен с применением пробит-функций. Для оценки повреждения промышленных зданий на близлежащей к газопроводу территории целесообразно использовать нижеприведенные функции [5].

Вероятность повреждений стен промышленных зданий, при которых возможно восстановление зданий без их сноса, может оцениваться по соотношению:

$$Pr_1 = 5 - 0,26 \ln V_1. \quad (16)$$

Фактор V_1 рассчитывается с учетом перепада давления в волне и импульса давления по соотношению

$$V_1 = \left(\frac{17500}{\Delta P} \right)^{8,4} + \left(\frac{290}{I} \right)^{9,3}. \quad (17)$$

Вероятность разрушений промышленных зданий, при которых здания подлежат сносу, оценивается следующей формулой:

$$Pr_2 = 5 - 0,22 \ln V_2. \quad (18)$$

В этом случае фактор V_2 рассчитывается по формуле

$$V_2 = \left(\frac{40000}{\Delta P} \right)^{7,4} + \left(\frac{460}{I} \right)^{11,3}. \quad (19)$$

После нахождения пробит-функций с помощью таблицы, имеющейся в методике, находятся значения самих вероятностей (см. табл. 2).

В нашем случае на расстоянии 30 м вероятность P повреждений стен промышленных зданий, при которых возможно восстановление зданий без их сноса, составляет $P = 54\%$, а вероятность разрушений промышленных зданий, при которых они подлежат сносу, — $P = 10\%$. Таким образом, высока вероятность, что промышленное здание возможно будет восстановить и примерно в пять раз ниже вероятность, что здание придется в последующем сносить.

Таблица 2

Связь вероятности поражения с пробит-функцией

P, %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		2,67	2,95	3,12	3,25	3,38	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,86	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,81
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

Следует отметить, что в методике [5] существует экспресс-оценка степени повреждения с помощью $P-I$ диаграммы. Но точность данной оценки существенно ниже и при этом часто возникают затруднения в интерпретации результата.

Оценим на расстоянии 30 м степень поражения людей. Для этого используется несколько пробит-функций.

Вероятность длительной потери управляемости у человека массой m (состояние нокдауна), попавшего в зону действия ударной волны при взрыве, может быть оценена по величине пробит-функции с учетом параметра V_3 , а также безразмерного давления \bar{p} и безразмерного импульса \bar{l} :

$$\begin{aligned}\bar{p} &= 1 + \frac{\Delta P}{P_0}; \\ \bar{l} &= \frac{I}{P_0^{\frac{1}{2}} m^{\frac{1}{3}}}; \\ V_3 &= \frac{4,2}{\bar{p}} + \frac{1,3}{\bar{l}}; \\ Pr_3 &= 5 - 5,74 \ln(V_3).\end{aligned}\tag{20}$$

Подставив ранее рассчитанные значения, получим следующие результаты: $\bar{p} = 1,18$, $\bar{l} = 0,42$, $V_3 = 6,65$, $Pr_3 = -5,88$. Отрицательная пробит-функция означает, что вероятность нокдауна на данном расстоянии стремится к 0 %.

Возможно также провести анализ вероятности разрыва барабанных перепонок у людей от уровня перепада давления в воздушной волне по следующему выражению:

$$Pr_4 = -12,6 + 1,524 \ln \Delta P.\tag{21}$$

Поскольку при $R = 30$ м величина $\Delta P = 1820$ Па, получаем $Pr_4 = 2,35$ и вероятность разрыва барабанных перепонок $P \approx 0\%$.

Рассчитаем вероятность отброса людей волной давления по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned}V_5 &= 7,38 \cdot \frac{10^3}{\Delta P} + 1,3 \cdot \frac{10^9}{\Delta P I}; \\ Pr_5 &= 5 - 2,44 \ln V_5.\end{aligned}\tag{22}$$

Расчеты дают значения $V_5 = 124,4$, $Pr_5 = -6,77$. Следовательно, вероятность отброса людей волной на данном расстоянии $P \approx 0\%$.

Таблица 3

Константы для определения радиусов зон поражения

Характеристика действия ударной волны	I^* , Па·с	P^* , Па	k , Па ² ·с
Разрушение зданий			
Полное разрушение зданий	770	70100	886100
Граница области сильных разрушений: 50-75 % стен разрушено или находится на грани разрушения	520	34500	541000
Граница области значительных повреждений: повреждение некоторых конструктивных элементов, несущих нагрузку	300	14600	119200
Граница области минимальных повреждений: разрывы некоторых соединений, расчленение конструкций	100	3600	8950
Полное разрушение остекления	0	7000	0
50 % разрушения остекления	0	2500	0
10 % и более разрушения остекления	0	2000	0
Поражение органов дыхания незащищенных людей			
50 % выживания	440	243000	1,44·10 ⁸
Порог выживания (при меньших значениях смертельные поражения людей маловероятны)	100	65900	1,62·10 ⁷

Следует отметить, что расчет параметров ударной волны и степени поражения на различных расстояниях может занять длительное время. Для снижения трудоемкости и удобства нанесения зон поражения на карту можно использовать метод, основанный на численном решении уравнения [5]

$$k/(\Delta P(R) - P^*) = l(R) - I^*, \quad (23)$$

где константы k , P^* , I^* зависят от характера зоны поражения и определяются из табл. 4 методики [5]. На практике удобнее выражение привести к следующему виду

$$\frac{k/(\Delta P(R) - P^*)}{l(R) - I^*} = 1$$

и путем подгона левой части, например в электронной таблице «Microsoft Excel», добиться равенства выражения единице. Опыт показывает, что данная процедура занимает считанные минуты.

Среди возможных зон можно найти зону полных разрушений зданий, зону сильных разрушений (50–75 % стен разрушено или находится на грани разрушения), а также зону 50 % выживания и порог выживания. Порог выживания означает, что при меньших расстояниях смертельные поражения людей маловероятны.

Всего, согласно методике, можно рассчитать девять зон (см. табл. 3). Таким образом, можно получить довольно большое количество информации о степени поражения людей и разрушении зданий. Полученные результаты для большей наглядности можно представить в соответствующем масштабе на карте.

Предлагаемая в методике [5] более простая формула (41) для определения радиусов зон поражения, используемая, как правило, для оценки последствий взрывов конденсированных ВВ, нами не рекомендуется ввиду неточности.

На основании проделанной работы можно сделать вывод о целесообразности применения рассмотренной методики и ее информативности для расчета параметров взрыва газа на магистральных и возникающих поражающих факторов. При этом может быть получена детальная информация о степени повреждения зданий и поражении людей.

Список литературы

1. Вяхирев Д. А., Шушунова А. Ф. Руководство по газовой хроматографии. М.: Высшая школа, 1975. 302 с.
2. Вяхирев Р. И., Макаров А. А. Стратегия развития газовой промышленности России. М.: Энергоатомиздат, 1997. 344 с.
3. Обеспечение мероприятий и действий сил ликвидации ЧС: учебник / под ред. С. К. Шойгу Калуга: ГУП «Облиздат», 1998. Ч. 2. Кн. 2. 176 с.

4. Пирогов С. Ю., Акулов Л. А., Ведерников М. В., Кириллов Н. Г. и др. Природный газ. СПб.: НПО «Профессионал», 2006. 848 с.
5. РД 03–409–01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей.
6. Ситтинг М. Процессы окисления углеводородного сырья. М.: Химия, 1970. 300 с.
7. СНиП 42–01–2002. Газораспределительные системы.
8. СП12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
9. Храмов Г. Н. Горение и взрыв. СПб.: СПбГПУ, 2007. 278 с.

Summary

Shilov S. V. Factors of defeat in case of depressurization of gas mains

In the work the comparative analysis of several procedures is led and the model of calculation of factors of defeat at explosion of a cloud of methane is offered. The model of explosion allows to consider the character of development area and to define possible zones of defeat about a gas main.

Keywords: gas main, blast effects, shock wave, impulse wave, the affected area.

СыктГУ

Поступила 01.10.2014