

УДК 622.692.4.07 + 662.692.2 + 621.6.028

ОБ УСТАНОВЛЕНИИ МИНИМАЛЬНЫХ БЕЗОПАСНЫХ РАССТОЯНИЙ ДО МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

В.Г. Калиниченко Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси.

Нормативные минимальные безопасные расстояния (МБР) от оси магистральных газопроводов (МГ) до населенных пунктов, зданий и сооружений в зависимости от их диаметра, уязвимости, значимости и достаточности обеспечения безопасности данных объектов задаются нормами проектирования СНиП 2.05.06-85 и СП 36.13330.2012. Эти нормы установлены в результате многолетнего опыта происшедших аварий на МГ и частично на основании моделирования их последствий. В таблице 1 приведен фрагмент из таблицы 4 [1, 2] для зон МБР.

Согласно примечания 4 к таблице 4 [1, 2], при соответствующем обосновании допускается сокращать указанные расстояния от МГ не более, чем на 30 % при условии отнесения участков трубопроводов ко II категории со 100 %-ным рентгеноконтролем монтажных сварных соединений

и не более, чем на 50 % для поз. 1, 2, а для поз. 3 не более, чем на 30 % – при отнесении их к категории В.

Можно пояснить конструктивные отличия категорий участков на примере МГ с $D_n = 1,22$ м и $p = 5,4$ МПа. Рассматриваем классы прочности труб по ГОСТ 20295-85: К 55 с $R_1^H \equiv \sigma_B^H = 539$ МПа и $R_2^H \equiv \sigma_T^H = 372$ МПа; К 56 с $R_1^H \equiv \sigma_B^H = 550$ МПа и $R_2^H \equiv \sigma_T^H = 382$ МПа. По СНиП 2.05.06-85: категория качества труб и соответствующий ей коэффициент надежности по материалу $k_1 = 1,34$; коэффициент надежности по назначению трубопровода $k_n = 1,05$; коэффициент надежности по нагрузке $n = 1,1$; коэффициенты условий работы при расчете на прочность для участков: категории В – $m = 0,6$; категории I-II – $m = 0,75$; категории III-IV – $m = 0,9$.

Таблица 1

Объекты, здания и сооружения	Минимальные расстояния от оси МГ, м условным диаметром, мм				
	св. 300 до 600	св. 600 до 800	св. 800 до 1000	св. 1000 до 1200	св. 1200 до 1400
1. Города и другие населенные пункты; коллективные сады с садовыми домиками, дачные поселки; отдельные промышленные и сельскохозяйственные предприятия; гаражи и стоянки на 20 и более автомобилей; отдельно стоящие здания с массовым скоплением людей; жилые здания 3-этажные и выше; железнодорожные станции, аэропорты.	150	200	250	300	350
2. Железные дороги общей сети и автодороги I-III категорий; отдельно стоящие: жилые здания 1-2-этажные; садовые домики, дачи; дома линейных обходчиков; с/х фермы и проч.	125	150	200	225	250
3. Отдельно стоящие нежилые и подсобные строения; гаражи и открытые стоянки на 20 автомобилей и менее; железные дороги промышленных предприятий; автомобильные дороги III-п, IV, IV-п и V категорий.	50	100	150	175	200

Используя известные выражения для расчетного сопротивления растяжению (сжатию) R_1 , расчетной толщины стенки δ , коэффициента запаса прочности k , действующего окружного напряжения σ

$$R_1 = \frac{R_1^H \cdot m}{k_1 \cdot k_H}; \quad \delta = \frac{n \cdot p \cdot D_H}{2 \cdot (R_1 + n \cdot p)}$$

$$k = \frac{k_1 \cdot n \cdot k_H}{m}; \quad \sigma = \frac{p \cdot (D_H - \delta)}{2 \cdot \delta}$$

получим следующие их значения для участков категорий

V ($m = 0,6$): $R_1 = 229,8 \div 234,5$ МПа;
 $\delta = 0,015$ м; $k_B = 2,58$; $\sigma / \sigma_T^H = 0,58 \div 0,57$;

I-II ($m = 0,75$): $R_1 = 287,3 \div 293,2$ МПа;
 $\delta = 0,012$ м; $k_{I-II} = 2,06$; $\sigma / \sigma_T^H = 0,73 \div 0,71$;

III-IV ($m = 0,9$): $R_1 = 344,8 \div 351,8$ МПа;
 $\delta = 0,010$ м; $k_{III-IV} = 1,72$; $\sigma / \sigma_T^H = 0,88 \div 0,85$.

При этом $k_B / k_{I-II} = 1,25$; $k_B / k_{III-IV} = 1,5$. То есть, уменьшение МБР до участков МГ возможно за счет увеличения для них коэффициента запаса прочности (повышения надежности).

В развитие и уточнение норм и правил проектирования МГ в работах [3, 4, 5] на основе нормативно-вероятностного подхода установлено, что коэффициент условий работы трубопровода является не постоянной величиной, как в СНиП 2.05.06-85, а переменной в зависимости от запаса работоспособности, дефектности металла и вариации нагрузки. Возможное сочетание численных значений коэффициентов k_1 , m в зависимости от допустимой частоты отказов q участков различных категорий приведено в таблице 2. При этом вероятность безотказной работы трубопровода $P = 1 - Q$, $Q = q \times t$, где Q – вероятность отказа, t – расчетный срок эксплуатации в годах.

Таблица 2 [3, 4, 5]

Коэффициент надежности по материалу, k_1			
1,34	1,40	1,47	1,55
Коэффициент условий работы, m [категория V, частота отказов $q = 10^{-8}$ год ⁻¹ (невероятное событие)]			
0,60	0,55	0,46	0,40
Коэффициент условий работы, m [категории I, II, частота отказов $q = 10^{-5}$ год ⁻¹ (неправдоподобное событие)]			
0,75	0,72	0,65	0,60
Коэффициент условий работы, m [категории III, IV, частота отказов $q = 10^{-3}$ год ⁻¹ (маловероятное событие)]			
0,90	0,87	0,83	0,80

Инженерные методики для расчета зон поражения при авариях МГ описаны в СТО Газпром 2-2.3-351-2009 [6]. Основными поражающими факторами аварий на МГ являются:

- 1) воздушная волна сжатия (ВВС) при разрыве МГ;
- 2) разлет фрагментов трубопровода и грунта;
- 3) зоны загазованности;
- 3) тепловое излучение низкоскоростного вертикального или наклонного шлейфа («колонны») газа или горячей высокоскоростной струи газа.

Были выполнены расчеты по методике Приложения Ж.3 [6] избыточного давления ΔP_ϕ фронта ВВС на удалении от места разрыва МГ различных диаметров, результаты которых приведены на рис. 1. Ориентировочно разрушение до 5% остекления зданий происходит при $\Delta P_\phi = 1 \div 2$ кПа, разрушение остекления на 90% – при $\Delta P_\phi = 5 \div 10$ кПа. Легкие поражения людей наступают при $\Delta P_\phi = 20 \div 40$ кПа, тяжелые поражения – при $\Delta P_\phi = 60 \div 100$ кПа. Полностью разрушаются деревянные строения – при $\Delta P_\phi = 20 \div 30$ кПа, кирпичные – при $\Delta P_\phi = 35 \div 45$ кПа.

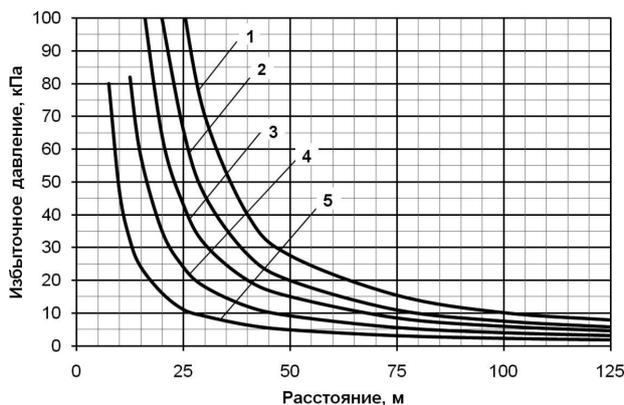


Рис. 1. Изменение избыточного давления ВВС от места аварии:
 1 – Ду 1400 мм; 2 – Ду 1200 мм; 3 – Ду 1000 мм;
 4 – Ду 700 мм, 5 – Ду 500 мм

Также проводились контрольные расчеты в Mathcad по методике Приложения Ж.1 [6] для дальности метания фрагментов МГ и грунта при его разрыве. Полученные результаты значительно отличались в большую сторону от приведенных в этом документе, что возможно вызвано опечаткой в системе дифференциальных уравнений баллистики разлета осколков. Кроме того, рассчитанные траектории полета осколков с учетом сопротивления воздуха представляли симметричные параболы относительно максимальной высоты, а в реальности нисходящая ветвь траектории должна быть более крутой.

Согласно статистическим данным, приведенным в [6], разрушения газопроводов сопровождались в большинстве случаев образованием относительно небольшого числа фрагментов труб (в пределах от 1 до 15 единиц). Из 271 аварии с разлетом осколков (за период 1991–2000 гг.) в 59 % случаев дальность разлета составила до 50 м, в 13 % – от 51 до 100 м, в 12 % – от 101 до 150 м, в 8 % – от 151 до 200 м, в 6 % – от 201 до 300 м. Среднее значение и максимальная дальность разлета осколков трубы зависят от характера разрушения оболочки трубы – вязкого или хрупкого, таблица 2 [7]. При авариях на газопроводах, построенных с использованием высоковязких сталей, часто происходит не разрыв на куски, а верхняя развальцовка труб с образованием двух-трех фрагментов трубопровода как с выбросом их из траншеи, так, зачастую, и без выброса фрагментов из траншеи.

Таблица 3 [7]

Вид разрушения трубы	Количество аварий	Средний радиус разлета, м	Максимальное удаление, м
Вязкое разрушение	6	106,5	180
Хрупкое разрушение	33	171	400 (700)
Нет данных	40	99,5	400

На рис. 2 приведены результаты расчетов дальности разлета фрагментов при разрыве МГ, выполненных по эмпирической формуле из [8] и диссертации Маянц Ю. А. для максимального радиуса разлета осколков при разрыве пневматически испытываемого трубопровода. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с выше приведенными статистическими данными.

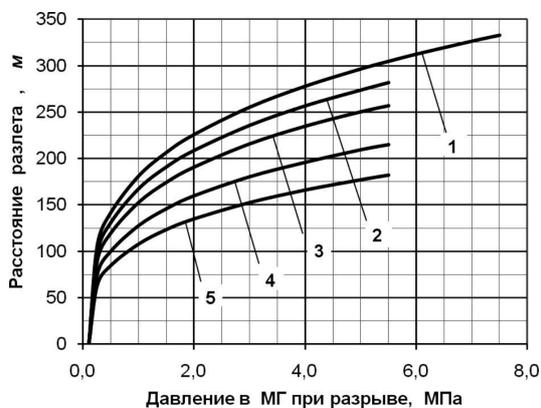


Рис. 2. Максимальная дальность разлета фрагментов при разрыве МГ:
1 - Ду 1400 мм, 2 - Ду 1200 мм, 3 - Ду 1000 мм, 4 - Ду 700 мм, 5 - Ду 500 мм

В силу небольшого количества образующихся осколков и большой площади круга их рассеивания вероятность поражения осколками отдельно стоящих людей является маловероятным событием.

Наиболее значимым поражающим фактором при авариях, связанным с разрывом газопровода, является воспламенение истекающего газа, происходящее либо в виде пожара в котловане: – при взаимодействии двух встречных струй, либо в виде факельного горения («струевые пламена»): – при смещении частей газопровода. Для сценария горения «пожар в котловане» на рис. 3 приведены кривые распределения теплового потока с удалением от места разрыва МГ. Кривые 1, 1*, 4, 4* взяты из рис. Ж.14 [6], а остальные построены по результатам проведенных расчетов по методике приложений Е и Ж [6].

Расчеты тепловых потоков выполнялись для интенсивностей истечения $G(t_{рек})$, соответствующих рекомендуемым [6] моментам времени после разрыва газопроводов: для Ду 500 – 30 с, Ду 700 – 45 с, Ду 1000, Ду 1200, Ду 1400 – 60 с.

Расстояние термического воздействия для факельного горения больше чем для «пожара в котловане», но положительным фактором при этом является то, что смещение концов при разрыве газопровода в подавляющем числе случаев не превышает 15° – 20° и факелы направлены близко к оси газопровода.

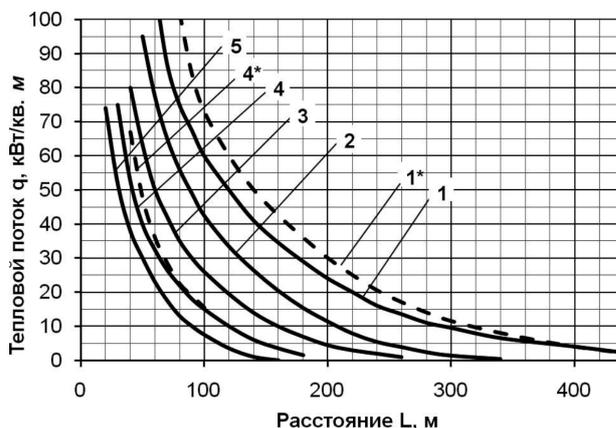


Рис. 3. Распределение теплового потока на уровне поверхности земли при пожаре на газопроводе при сценарии горения «пожар в котловане» в неподвижной атмосфере. 1 - Ду 1400 мм, $\Sigma G = 7000$ кг/с; 2 - Ду 1200 мм, $\Sigma G = 4200$ кг/с; 3 - Ду 1000 мм, $\Sigma G = 2800$ кг/с; 4 - Ду 700 мм, $\Sigma G = 1300$ кг/с; 5 - Ду 500 мм, $\Sigma G = 700$ кг/с; (кривые 1*, 4* – при $L_{ф}/D_{эф} = 4$, остальные – при $L_{ф}/D_{эф} = 2$, где $L_{ф}$ – фактическая высота цилиндра пламени, м; $D_{эф}$ – эффективный диаметр очага пожара, м)

Значения интенсивности теплового излучения q , кВт/м² для различных степеней поражения человека и повреждения сооружений приведены в таблице 4.

Таблица 4 [9, 10]

Степень поражения	Интенсивность излучения
Боль достигается после воздействия в течение 10 с (для незащищенной кожи).	3 кВт/м ²
Боль достигается после воздействия в течение 5 с (для незащищенной кожи). Воздействие в течение нескольких минут вызывает ожоги 2-й и 3-й степени.	5 кВт/м ²
Риск смерти от воздействия в течение 20 с равен 1 %. Предельное значение максимального теплового потока для незащищенных сооружений. Необходимо охлаждение против загорания.	10 кВт/м ²
Экспозиция в течение нескольких секунд вызывает ожоги 2-й и 3-й степени. Риск смерти от воздействия в течение 20 с равен 7 %.	12,5 кВт/м ²
Возникновение вторичных пожаров из-за теплового излучения в случае воздействия в течение нескольких секунд.	20 кВт/м ²
97 % вероятность смерти в случае воздействия в течение 20 с. Предельное значение для максимально допустимой интенсивности теплового излучения для защищаемых конструкций.	35 кВт/м ²

Для наиболее опасных участков линейной части МГ мерами безопасности, снижающими риск аварии и ее воздействие, могут быть: увеличение толщины стенки трубопровода для ограничения уровня кольцевых напряжений, увеличение глубины его залегания, перенос запорных устройств к месту возможной аварии [11], установка автоматов аварийного закрытия линейных кранов для отключения участка при аварийной ситуации, прокладка МГ в защитном футляре (кожухе) и увеличение его протяженности [12], контроль загазованности между трубопроводом и кожухом, обеспечение защиты МГ от преступных посягательств.

Сравнительный анализ способов обеспечения безопасности при прокладке МГ на густонаселенных территориях, установленных зарубежными

стандартами, выполнен в работе [13]. Основные выводы из этого анализа приведены ниже.

В ряде стран (США, Канада, Австралия) отсутствуют законодательно установленные минимальные безопасные расстояния от МГ. Вместо этого в областях с высокой плотностью населения предусматриваются дополнительные технические требования по обеспечению безопасности: снижение рабочего давления; ограничение уровня расчетных кольцевых напряжений величиной $0,72 \div 0,4$ от нормативного предела текучести металла трубы; увеличение толщины стенки; уменьшение расстояния между задвижками (с 16, 25, 30 км до 4, 8, 15 км); увеличение минимального заглубления и т.д.), требования к мониторингу (например, частота патрулирования, чувствительность системы обнаружения утечек и т.д.), установление запретных охранных зон.

В Германии нормативными документами задаются только запретные охранные зоны шириной до 8-10 м от оси МГ, а безопасность при прокладке на густонаселенных территориях обеспечивают способами: увеличением толщины стенки; ограничением рабочего давления; уменьшением расстояния между задвижками (с 18 до 10 км).

В Великобритании безопасные расстояния при проектировании МГ задаются по контурам индивидуального риска (10^{-5} 1/год); способами обеспечения безопасности являются: уменьшение расчетного давления; ограничение уровня расчетных кольцевых напряжений величиной $0,72 \div 0,3$ от нормативного предела текучести металла трубы; увеличение толщины стенки.

В Японии безопасные расстояния в диапазоне $25 \div 65$ м нормируются только для надземных МГ до мест с массовым скоплением людей. Способами обеспечения безопасности на густонаселенных территориях являются: расположение задвижек через 1 км; задается номинальная толщина стенки для каждого типоразмера труб.

Из сравнения предлагаемых зарубежными стандартами зон с зонами действия поражающих факторов при авариях на МГ следует, что они фактически безопасными не являются. Анализ зарубежной практики показывает фактический отказ от установления безопасных расстояний между МГ и объектами воздействия в пользу сокращения времени случайного нахождения людей в опасных зонах и снижения вероятности перерастания инцидентов в крупные аварии – «защита временем».

Список использованных источников

1. СНиП 2.05.06-85* Магистральные трубопроводы. - 60 с.
2. СП 36.13330.2012 Свод правил. Магистральные трубопроводы (актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*). М. – 2013. -78 с.
3. Методика вероятностного анализа несущей способности проектируемых трубопроводов. И.А. Хохлова, Л.М. Султанова. Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 13, № 1(2), 2011. с. 497-499.
4. Хохлова И.А. Обеспечение работоспособности проектируемых трубопроводов путем усовершенствования метода прочностного расчета по предельному состоянию. Автореферат диссертации к.т.н., Уфа – 2011. -25 с.
5. Назаров Д.В. Совершенствование проектных норм надежности магистральных трубопроводов. Диссертация к.т.н., Уфа – 2015. -106 с.
6. СТО Газпром 2-2.3-351-2009 Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром» (взамен СТО РД Газпром 39-1.10-084-2003). -376 с.
7. Методическое обеспечение анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО «Газпром». Сафонов В.С., Ковалев С.А., Ганага С.В. Презентация доклада на ежегодном семинаре ДПБ-2009. М., 20 октября 2009 г. -21 с.
8. Ю.А. Маянц, С.В. Карпов, А.С. Алихашкин, С.В. Овчаров Назначение участков предварительных испытаний и охранных зон при проведении испытаний магистральных трубопроводов. Н.-г. сб. «Вести газовой науки», № 1(17)/ 2014. С. 88-92.
9. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий. ВНИИ противопожарной обороны. М. – 2006. -61 с.
10. FPS Home Affairs Directorate-General for Civil Security. Manual Dealing with incidents involving pipelines. Natural Gas Action Card. June 2009 – version 2.2. Brussels. p. 32.
11. Снижение интенсивности действия поражающих факторов при разрывах магистральных газопроводов. А.С. Мазур, И.Г. Янковский, А.А. Козлов, Т.В. Украинцева, Л.В. Костюк, Е.В. Харьковец. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2013, № 19 (45). С. 86-88.
12. Швыряев А.А. Химический факультет МГУ. Количественный анализ риска при обосновании проектных решений прокладки газопроводов методом «труба в трубе». Ежегодный тематический семинар ДПБ и страхование 2011. -28 с.
13. Савина А.В. Анализ риска аварий при обосновании безопасных расстояний от магистральных трубопроводов сжиженного углеводородного газа до объектов с присутствием людей. Диссертация к.т.н., М. – 2013. -121 с.