

Определение места и размера утечки на газопроводах

М.В. Ксензов

Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт им. А.К. Кортунова

Аннотация: Рассматриваются основные вопросы, касающиеся определения места и размера утечки на газопроводах. Показаны основные методы по определению местоположения утечки, а также предложена математическая модель, с помощью которой можно найти утечку на газопроводах. Проанализирован процесс изменения давления при различных рабочих режимах. Рассмотрены три варианта возникновения утечек газа.

Ключевые слова: Утечки газа, сеть газопроводов, природный газ, изменение параметров сети, испытание газопроводов.

Для поддержания в рабочем состоянии всех сетей газопроводов, структур и задействованных в работе устройств, очень важным является проведение всех необходимых мероприятий, которые определяли бы утечки газа и таким образом исключали ненужные потери природного газа, гарантировали безопасность обслуживающего персонала, а также защиту окружающей среды [1, 2]. Большое значение здесь имеет, как определение места и размера утечки, так и газовые эмиссии, которые произошли при разрыве газопровода. Если существует опасность того, что газопровод имеет утечку, или если испытание давлением закончилось отрицательным результатом, необходимо организовать дальнейшие исследования для локализации утечек и неплотностей, в соответствии с действующими письменными инструкциями.

Для определения утечек в литературе [3] были встречены следующие методы:

1. Разделение газопровода на мелкие участки, и проведение повторного испытания.
2. Добавление красящего вещества в воду, для лучшего распознавания неплотности.
3. Добавление гексафторида серы SF_6 , и проведение испытания с подходящим детектором.
4. Добавление гелия и проведение испытания с подходящим детектором.

5. Добавление метана CH_4 с концентрацией ниже предела взрываемости, и проведение испытания с подходящим детектором.
6. Испытания ультразвуком.

После успешного испытания уполномоченный персонал составляет протокол проверки газопровода [4].

Но для проведения проверки газопроводов по данным методам, необходимо непосредственное испытание газопроводов, что не всегда является возможным, поэтому была проанализирована возможность определения места утечки с помощью математической модели. Для того, чтобы составить математическую модель определения места и размера утечки необходимо смоделировать ситуацию на примере. Так в системе газопроводов образовалась утечка, размер утечки, как и ее месторасположение неизвестно. Для того, чтобы найти два обозначенных значения будет проанализирован процесс изменения давления при различных рабочих режимах.

Для исследования рассмотрим три наиболее часто встречаемых варианта:

1. Изменение давления в газопроводе при утечке в пункте «х», без изменения начального давления и подачи дополнительного количества газа.
2. Изменение давления в газопроводе при утечке в пункте «х», без изменения начального давления, но при подаче дополнительного количества газа.
3. Изменение давления в газопроводе при утечке в пункте «х», при стабильном конечном давлении и без увеличения подачи газа.

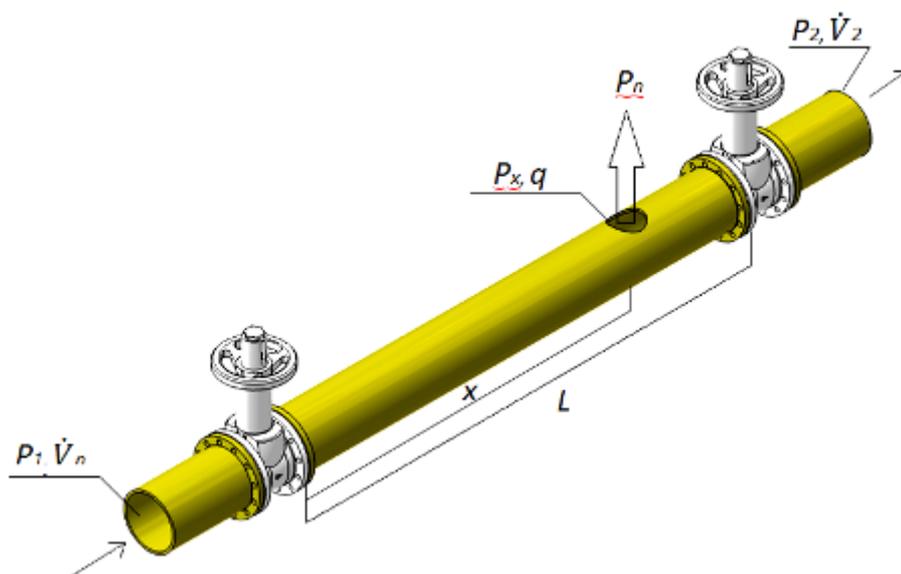


Рис. 1. – Газопровод с образовавшейся утечкой.

где P_1, P_2 – начальное и конечное давление, P_x – давление в области утечки, L – общая длина газопровода, x – расстояние до утечки, q – утечка, \dot{V}_n, \dot{V}_2 – объемный расход газа в начале и конце газопровода.

Случай 1.

По длине газопровода происходит утечка в пункте «х» и состояние истечения газа меняется. В конечной точке газопровода наблюдается уменьшение поступающего количества газа \dot{V}_2 . Тогда пропускная способность соответствует подводимому количеству \dot{V}_n минус количество газа из-за утечки \dot{V}_{leak} . Одновременно изменяется конечное давление на P_2 . На рис. 2 и 3 представлены изменение давления при стабильной работе сети и при возникновении утечки.

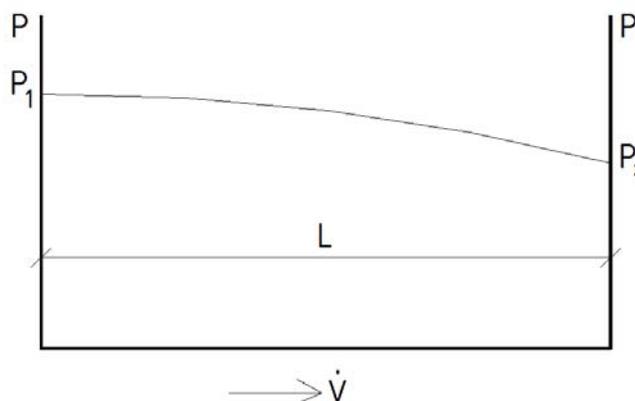


Рис. 2. – Изменение давления по длине газопровода при стабильной работе.

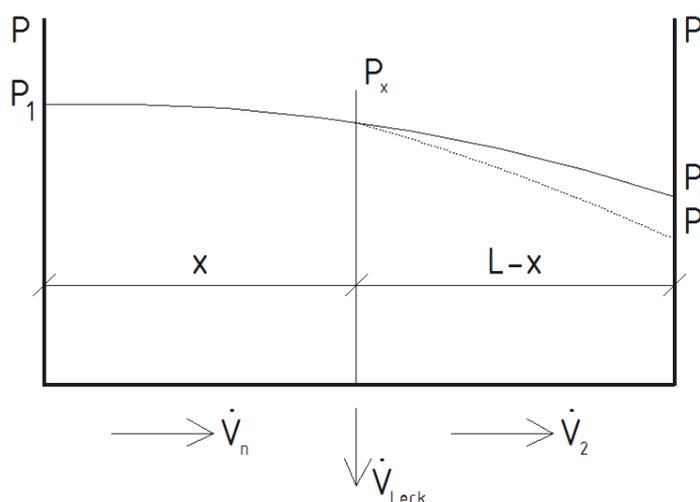


Рис. 3. – Возникновение утечки по длине газопровода в пункте «х», без изменения начального давления P_1 и подачи дополнительного количества газа \dot{V}_n .

При известных начальных параметрах газа, можно определить конечное давление P_2 при работе сети в нормальном режиме:

$$p_2 = p_1 \cdot \sqrt{1 - \lambda \cdot \frac{L}{D_i^5} \cdot \frac{16}{\pi^2} \cdot \rho_n \cdot \frac{T_m}{T_n} \cdot \frac{p_n}{p_1^2} \cdot \dot{V}_n^2 \cdot K_m}$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления, D_i – диаметр газопровода (внутренний), ρ_n – плотность газа при нормальных условиях, T_n –



температура газа при нормальных условиях. T_m – средняя температура газа, K_m - коэффициент сжимаемости, \dot{V}_n –объемный расход газа в нормальных условиях.

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^2 = 1 - \lambda \cdot \frac{L}{Di^5} \cdot \frac{16}{\pi^2} \cdot \rho_n \cdot \frac{T_m}{T_n} \cdot \frac{p_n}{p_1^2} \cdot \dot{V}_n^2 \cdot K_m$$

$$p_2^2 = p_1^2 - \lambda \cdot \frac{L}{Di^5} \cdot \frac{16}{\pi^2} \cdot \rho_n \cdot \frac{T_m}{T_n} \cdot p_n \cdot \dot{V}_n^2 \cdot K_m$$

$$p_1^2 - p_2^2 = \lambda \cdot \frac{L}{Di^5} \cdot \frac{16}{\pi^2} \cdot \rho_n \cdot \frac{T_m}{T_n} \cdot p_n \cdot \dot{V}_n^2 \cdot K_m$$

$$p_1^2 - p_2^2 = \lambda \cdot \frac{1}{Di^5} \cdot \frac{16}{\pi^2} \cdot \rho_n \cdot \frac{T_m}{T_n} \cdot p_n \cdot \dot{V}_n^2 \cdot K_m \cdot L$$

Для удобства расчетов введем фактор «С». Величина «С» будет охватывать все единицы, кроме длины L объемного расхода газа \dot{V}_n . Тогда:

$$C = \lambda \cdot \frac{1}{Di^5} \cdot \frac{16}{\pi^2} \cdot \rho_n \cdot \frac{T_m}{T_n} \cdot p_n \cdot K_m$$

$$p_1^2 - p_2^2 = C \cdot L \cdot \dot{V}_n^2$$

Полный процесс истечения газа можно поделить на два отрезка, от P_1 до P_x и от P_x до P_3 , тогда:

$$p_1^2 - p_x^2 = C \cdot x \cdot \dot{V}_n^2$$

$$p_x^2 - p_3^2 = C \cdot (L - x) \cdot \dot{V}_n^2$$

Тогда:

$$p_1^2 - p_3^2 = C \cdot (x \cdot \dot{V}_n^2 + (L - x) \cdot \dot{V}_n^2) \tag{1}$$

Если мы знаем \dot{V}_2 , например при измерении давления газа в конце газопровода, тогда становится возможным определить давление P_3 :

$$p_3 = p_1 \cdot \sqrt{1 - \lambda \cdot \frac{L}{D i^5} \cdot \frac{16}{\pi^2} \cdot \rho_n \cdot \frac{T_m}{T_n} \cdot \frac{p_n}{p_1^2} \cdot \dot{V}_2^2 \cdot K_m}$$

Точно так можно найти \dot{V}_2 , если известно давление P_3 . Как правило, в конце газопровода известны давление или объемный расход (или же два параметра). Из одной единицы можно всегда выразить другую.

Итак, из выражения (1) можно определить положение утечки «х»:

$$\begin{aligned} p_1^2 - p_3^2 &= C \cdot (x \cdot \dot{V}_n^2 + (L - x) \cdot \dot{V}_2^2) = C \cdot x \cdot \dot{V}_n^2 + C \cdot L \cdot \dot{V}_2^2 - C \cdot x \cdot \dot{V}_2^2 \\ &= x \cdot (C \cdot \dot{V}_n^2 - C \cdot \dot{V}_2^2) + C \cdot L \cdot \dot{V}_2^2 \end{aligned}$$

$$x \cdot (C \cdot \dot{V}_n^2 - C \cdot \dot{V}_2^2) = (p_1^2 - p_3^2) - C \cdot L \cdot \dot{V}_2^2$$

$$x = \frac{(p_1^2 - p_3^2) - C \cdot L \cdot \dot{V}_2^2}{C \cdot (\dot{V}_n^2 - \dot{V}_2^2)}$$

Количество истекшего газа, может быть определено:

$$\dot{V}_{\text{течка}} = \dot{V}_n - \dot{V}_2$$

Т.к. давление газа в газопроводе больше, чем атмосферное давление, тогда скорость газа, в устье утечки, будет достигать скорости звука:

$$\alpha_0 = \sqrt{k \cdot R \cdot T_m \cdot Z_m}$$

Тогда, форма утечки находится:

$$A_{\text{течка}} = \frac{\dot{V}_{\text{течка}}}{\alpha_0}$$

Случай 2

Второй случай – это подача дополнительного количества газа \dot{V}_n на величину \dot{V}_2 , для того, чтобы компенсировать потери газа через утечку. При этом, начальное давление P_1 останется постоянным (см. Рис. 4).

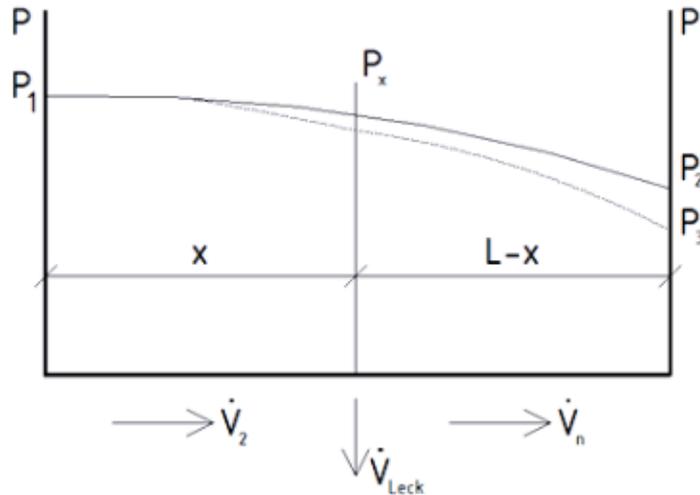


Рис. 4. – Возникновение утечки по длине газопровода в пункте «х», без изменения начального давления P_1 , но при подаче дополнительного

количества газа \dot{V}_2 .

Для участка от P_1 до P_x действует:

$$p_1^2 - p_x^2 = C \cdot x \cdot \dot{V}_2^2$$

Для участка от P_x до P_3 действует:

$$p_x^2 - p_3^2 = C \cdot (L - x) \cdot \dot{V}_n^2$$

Просуммировав оба выражения, получаем:

$$p_1^2 - p_3^2 = C \cdot x \cdot \dot{V}_2^2 + C \cdot L \cdot \dot{V}_n^2 - C \cdot x \cdot \dot{V}_n^2 = C \cdot x \cdot (\dot{V}_2^2 - \dot{V}_n^2) + C \cdot L \cdot \dot{V}_n^2$$

$$x = \frac{p_1^2 \cdot p_3^2 - C \cdot L \cdot \dot{V}_n^2}{C \cdot (\dot{V}_2^2 - \dot{V}_n^2)} = \frac{p_1^2 \cdot p_3^2 - p_1^2 \cdot p_2^2}{C \cdot (\dot{V}_2^2 - \dot{V}_n^2)} = \frac{p_2^2 - p_3^2}{C \cdot (\dot{V}_2^2 - \dot{V}_n^2)}$$

В случае, если P_3 известно, выразим V_2 :

$$\dot{V}_2 = \sqrt{\left(1 - \left(\frac{p_3}{p_1}\right)^2\right) \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{Dt^5}{L} \cdot \frac{\pi^2}{16} \cdot \frac{T_n}{T_m} \cdot \frac{p_1^2}{p_n} \cdot \frac{1}{\rho_n} \cdot \frac{1}{K_m}}$$

Количество истекшего газа, может быть определено:

$$\dot{V}_{\text{leak}} = \dot{V}_2 - \dot{V}_n$$

Случай 3.

Третий случай – это изменение начального давления P_1 , для того, чтобы сохранить конечное давление P_2 . Для случая, когда дополнительное количество газа не подводится, в начальном участке газопровода наблюдается пропускная способность \dot{V}_n . Начальное давление меняется на P_0 .

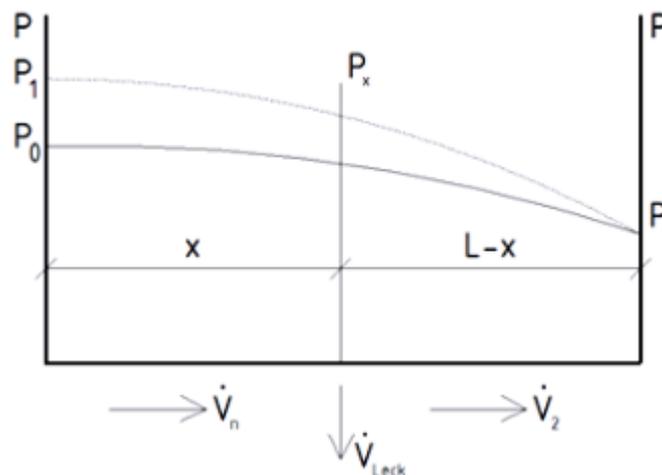


Рис. 5. – Возникновение утечки по длине газопровода в пункте «х», при стабильном конечном давлении P_2 и без увеличения подачи газа \dot{V}_2 .

Для участка от P_0 до P_x действует:

$$p_0^2 - p_x^2 = C \cdot x \cdot \dot{V}_n^2$$

Для участка от P_x до P_2 действует:

$$p_x^2 - p_2^2 = C \cdot (L - x) \cdot \dot{V}_2^2$$

Просуммировав оба выражения, получаем:

$$\begin{aligned} p_0^2 - p_2^2 &= C \cdot (x \cdot \dot{V}_n^2 + L \cdot \dot{V}_2^2 - x \cdot \dot{V}_2^2) = C \cdot x \cdot \dot{V}_n^2 + C \cdot L \cdot \dot{V}_2^2 - C \cdot x \cdot \dot{V}_2^2 \\ &= x \cdot (C \cdot \dot{V}_n^2 - C \cdot \dot{V}_2^2) + C \cdot L \cdot \dot{V}_2^2 \\ x \cdot (C \cdot \dot{V}_n^2 - C \cdot \dot{V}_2^2) &= p_0^2 - p_2^2 - C \cdot L \cdot \dot{V}_2^2 \end{aligned}$$

В случае, если P_0 известно, выразим V_2 :

$$\dot{V}_2 = \sqrt{\left(1 - \left(\frac{p_2}{p_0}\right)^2\right) \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{Di^5}{L} \cdot \frac{\pi^2}{16} \cdot \frac{T_n}{T_m} \cdot \frac{p_0^2}{p_n} \cdot \frac{1}{\rho_n} \cdot \frac{1}{K_m}}$$

Тогда:

$$x = \frac{p_0^2 - p_2^2 - C \cdot L \cdot \dot{V}_2^2}{C \cdot (\dot{V}_n^2 - \dot{V}_2^2)}$$

Количество истекшего газа, может быть определено:

$$\dot{V}_{\text{истек}} = \dot{V}_2 - \dot{V}_n$$

Таким образом, приведенный алгоритм определения места и размеров утечки, может быть использован для практических расчетов определения месторасположение прорывов газопроводов в реальных условиях.

Литература

1. Скорняков, А.А. Направления по энергосбережению и повышению энергоэффективности на предприятиях магистрального транспорта газа // «Инженерный вестник Дона», 2011, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2011/420.
2. Страхова, Н.А., Лебединский П.А. Анализ энергетической эффективности экономики России // «Инженерный вестник Дона», 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/999.

3. DIN EN 12327. Gasinfrastruktur – Druckprüfung, In- und Außerbetriebnahme – Funktionale Anforderungen; Deutsche Fassung EN 12327: 2012. pp. 4-5.

4. СП 42-101-2003. Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб. ЗАО «Полимергаз». Москва 2003. С. 102-103.

5. Mischner, J. Zur Berechnung des Druckverlaufs in Gasrohrleitungen. 5/2009. pp. 267.

6. Правила безопасности в газовом хозяйстве. Издание 3-е с изменениями № 1 и № 2, утвержденными Госгортехнадзором России 11.02.92 г. и 14.12.92 г. С. 40-42.

7. Масловский, В. В. Основы технологии ремонта газового оборудования и трубопроводных систем: Учеб. пособие. – М.: Высш. школа, 2004. С. 56.

8. Волков, М. М., Михеев А. Л., Конев К. А. Справочник работника газовой промышленности. 2-е издание, перераб. и допол. 2007. С. 51.

9. Давидсон, В.Е. Основы гидрогазодинамики в примерах и задачах: учеб. пособие для студ. высш. учеб. завед. / В. Е. Давидсон. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. С. 101-105.

10. Kummel, W. Technische Strömungsmechanik. Theorie und Praxis. 3., überar. und ergänzte Auflage. B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden 2007. pp. 200.

References

1. Skornjakov, A.A. // Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2011, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2011/420.

2. Strahova, N.A., Lebedinskij P.A. // Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2012, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/999.



3. DIN EN 12327. Gasinfrastruktur – Druckprüfung, In- und Außerbetriebnahme – Funktionale Anforderungen; Deutsche Fassung EN 12327: 2012. pp. 4-5.

4. SP 42-101-2003. Obshhie polozhenija po proektirovaniju i stroitel'stvu gazoraspredelitel'nyh sistem iz metallicheskih i polijetilenovyh trub. ZAO «Polimergaz». Moskva 2003. pp. 102-103.

5. Mischner, J. Fachberichte. Zur Berechnung des Druckverlaufs in Gasrohrleitungen. 5/2009. pp. 267.

6. Pravila bezopasnosti v gazovom hozjajstve. Izdanie 3-e s izmenenijami № 1 i № 2, utverzhdennymi Gosgortehnadzorom Rossii 11.02.92 g. i 14.12.92 g. pp. 40-42.

7. Maslovskij, V. V. Osnovy tehnologii remonta gazovogo oborudovanija i truboprovodnyh sistem [Fundamentals of technology of repair of gas equipment and piping systems]. Ucheb. posobie. – M.: Vyssh. shkola, 2004. pp. 56.

8. Volkov, M. M., Miheev, A. L., Konev K. A. Spravochnik rabotnika gazovoj promyshlennosti [Handbook of gas industry]. 2-e izdanie, pererab. i dopol. 2007. pp. 51.

9. Davidson, V.E. Osnovy gidrogazodinamiki v primerah i zadachah [Fundamentals of fluid dynamics in the examples and problems]. Ucheb. posobie dlja stud. vyssh. ucheb. zaved. / V. E. Davidson. – M. : Izdatel'skij centr «Akademija», 2008. pp. 101-105.

10. Kummel, W. Technische Strömungsmechanik. Theorie und Praxis. 3., überar. und ergänzte Auflage. B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden 2007. pp. 200.