Моделирование истечения газа через отверстие в длинных трубопроводах, работающих под большим давлением

Н.Д. Якимов[1], А.И. Хафизова[2], О.С. Дмитриева[2], Е.В. Артемьева[1]

[1]Казанский государственный энергетический университет, Красносельская 51, Казань, Россия, 420066
[2]Казанский национальный исследовательский технологический университет, Карла Маркса 68, Казань, Россия, 420015

Аннотация. Аварии на трубопроводах являются не редкостью и для их локализации необходимо определить точное место разрыва трубопровода. В работе рассматривается время истечения газа из отверстия в длинной трубе под высоким давлением. Разработана методика расчета времени истечения природного газа из трубопровода. Построена математическая модель течения газа через отверстие, определены затраты на изотермическое и адиабатическое расширение. На конкретном примере выявлено время истечения газа из трубопровода для подготовки трубопровода к ремонтным работам.

1. Введение

В период урбанизации рост промышленных предприятий в крупных городах растет с каждым годом, потребляя все большее количество природного газа, тем самым увеличивая плотность магистральной сети трубопровода [1].

Эксплуатация магистрали сети трубопровода сопряжена с огромным числом рисков, поскольку разгерметизация трубопровода, вызванная аварией, приводит к потере в окружающую среду продуктов транспортировки, вызывая проблемы экономического характера, а иногда приводит к техногенной катастрофе [1,2,3].

На сегодняшний день наблюдается огромное число аварий на объектах газопровода, и с каждым годом их число увеличивается. Так, по данным Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору на октябрь 2017 года по сравнению с предыдущим годом возросло на 63%. Снижение аварийности магистрали трубопровода, своевременное реагирование и устранение проблемы является актуальной задачей общества.

Выделяют несколько факторов, приводящих к авариям: коррозия металла, механические повреждения трубопровода, повреждения трубопроводов в результате природных явлений, брак при строительстве, износ оборудования. Чаще всего аварийные ситуации происходят по вине самого человека, а именно, при производстве земляных работ. Так же часто можно встретить образование не больших пробоин, вследствие коррозии металла, а обнаружение и ремонт трубопровода в данном случае затруднителен, так как газ в трубопроводе находится при высоком давлении, а протяженность трубопровода может достигать нескольких десятков метров.

Для локализации мест разрыва часто используют электронные датчики температуры. Однако в ходе поиска аварии возникают проблемы при интерпретации показателей датчиков, так как пробоины, произошедшие в различных местах трубопровода, приводят к образованию различных сложных структур теплового поля на поверхности трубы. Поэтому происходит освобождение внутреннего пространства от газа, и только после этого проводится анализ поверхности магистрали. При освобождении трубопровода от газа возникает ряд трудностей: при не равномерном опорожнении трубы может возникнуть резкий перепад температуры, что приведет к перекосу трубы, трудно предсказать время, за которое давление газа в длинных трубопроводах будет приемлемым для начала работ по ликвидации аварии. Также расчет осложняет наличие теплообмена между газом в трубопроводе и окружающей средой. [4].

В связи с этим перед нами встает следующая задача: определить характеристики процесса истечения газа в трубе, а именно время истечения газа.

Цель работы – построить математическую модель процесса истечения через отверстие в длинных трубопроводах, работающих под высоким давлением.

2. Постановка проблемы

В ходе выполнения исследований решалась задача изотермического расширения в трубе, сопоставляя ее с адиабатическим. Это связано с тем, что процесс будет происходить не доли секунды, как в обычных процессах гидродинамического обтекания, когда естественно считать течение адиабатическим, а довольно длительное время. Такое охлаждение представляется нереальным – газ будет успевать нагреваться от металлических достаточно теплоёмких стенок трубы. Полный учёт теплообмена газа со стенками и внешней средой сильно усложнит рассмотрение процесса. Поэтому для грубой оценки представляется целесообразным принять за основную модель изотермического расширения газа в трубе. Правомерно ожидать, что значения характеристик реального процесса будут лежать между изотермическим и адиабатическим решениями, по крайней мере, по времени истечения.

Перед созданием математической модели задавались начальные условия и параметры. В трубопроводе внутренним диаметром $D = 0{,}516$ м и длиной $L = 10500$ м находится газ под давлением $p_0 = 12{,}3$ атм и температурой $T_0 = 293$ К. На одном конце трубопровода появляется круглое отверстие диаметром $d_a = 0{,}05$ м, через которое газ выходит в атмосферу с давлением $p_a = 1$ атм.

Для определённости в примере берутся характеристики метана, который считается совершенным газом, с постоянными теплофизическими характеристиками: газовая постоянная $R = 519{,}6$ Дж/кг/К; показатель адиабаты (изоэнтропы) $k = 1{,}32$; динамический коэффициент вязкости $\mu = 10{,}8{\cdot}10\text{-}6$ Па·с; плотность определялась по уравнению состояния $\rho = p/(R{\cdot}T)$.

Выделили основные факторы, определяющие время истечения:

1. Сопротивление движению газа через отверстие и около него (инерция при разгоне газа и потери).
2. Сопротивление вязкого трения при движении газа по трубопроводу.
3. Инерция при разгоне газа в трубе.

Расчёты вели по одномерной модели течения газа, выделяя два участка:

1. Одномерное нестационарное течение газа по длинной прямой трубе постоянного сечения с одним непроницаемым концом. Параметры газа (скорость w, давление p, плотность ρ, в адиабатическом случае температура T) являются функциями координаты x (удаления от конца) и времени τ. Для определённости будем считать конец трубы при $x = 0$ непроницаемым, а отверстие на конце $x = L$.

Так как уравнение состояния вместе с условием изотермичности или условием адиабатичности даёт однозначную связь давления (и температуры) с плотностью, то на участке трубопровода можно рассматривать две искомые функции – скорость $w(x,\tau)$ и плотность $\rho(x,\tau)$.

2. Истечение газа через отверстие в стенке в атмосферу. Его можно рассчитывать по обычным формулам для стационарного режима. Например, расход G однозначно рассчитывается по заданному давлению p_k перед отверстием или по плотности ρ_k.

На стыке участков должны быть равны давления и расходы

3. Математическая модель истечения газа через отверстие

Основные формулы [5, 6] будем записывать для адиабатического истечения совершенного газа через суживающееся сопло без учета потерь энергии. При этом возможны два режима истечения. При достаточно больших давлениях p_k перед отверстием оно будет критическим сечением для потока. За ним, в атмосфере, будет образовываться расходящаяся струя со сверхзвуковой скоростью при атмосферном давлении на границе струи, и далее так называемый спектр сопла. Соответственно, в самом отверстии параметры будут принимать критические значения. При меньших давлениях p_k поток будет полностью дозвуковым, а в отверстии и струе за ним давление можно считать атмосферным.

Таким образом, если критическое давление p_* для потока в отверстии, рассчитанное по давлению полного торможения для этого потока, превосходит атмосферное p_a, то поток будет иметь сверхзвуковые зоны, а сечение отверстия будет критическим. Если же рассчитанное критическое давление меньше атмосферного, то оно не сможет реализоваться, и поток будет полностью дозвуковым.

Поскольку сечение трубы много больше сечения отверстия, и средняя скорость газа в трубе мала по сравнению с отверстием, значения p_k, ρ_k, T_k параметров потока в трубе в районе отверстия можно принять за значения параметров полного торможения для потока в отверстии. Тогда для критического давления p_* имеет место соотношение $p_* = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} p_k$, и условие сверхзвукового истечения будет $p_* > p_a$, то есть:

$$\frac{p_k}{p_a} > \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}} \tag{1}$$

Если вместо давления основной переменной считается плотность, то условие (1) запишется по уравнению состояния в виде:

$$\frac{\rho_k T_k}{\rho_a T_0} > \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \tag{2}$$

где $\rho_a = \frac{p_a}{RT_0}$ – плотность газа при атмосферном давлении и температуре T_0.

В случае изотермического расширения $T_k = T_0$ и условие (2) принимает вид:

$$\frac{\rho_k}{\rho_a} \geq \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}} \tag{3}$$

При его выполнении в отверстии имеют место критические значения параметров, и расход равен:

$$G_s = \rho_* w_* f_a, \tag{4}$$

где $\rho_* = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \rho_k$, $f_a = \pi d_a^2 / 4$ – площадь сечения отверстия, $w_* = \left(\frac{2kR}{k+1} T_0\right)^{1/2}$ – критическая скорость, то есть:

$$G_s = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} f_a \rho_k \sqrt{kRT_0}\,. \tag{5}$$

Если давление в трубе снизилось настолько, что (3) не выполняется, и

$$1 < \frac{\rho_k}{\rho_a} < \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}, \tag{6}$$

то, можно использовать понятие приведённого удельного расхода $q = \frac{\rho_{\text{out}} w_{\text{out}}}{\rho_* w_*} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \frac{\rho_{\text{out}}}{\rho_k}$, где $\lambda = \frac{w_{\text{out}}}{w_*}$ – приведённая скорость, связанная с плотностью соотношением

$\lambda=\left\{\frac{k+1}{k-1}\left[1-\left(\frac{\rho_{\text{out}}}{\rho_k}\right)^{k-1}\right]\right\}^{1/2}$. Теперь вместо (4) имеем $G_u=\rho_* w_* f_a q=G_s q$, и, подставляя сюда указанные соотношения, получаем:

$$G_u=\left(\frac{2kRT_0}{k-1}\right)^{1/2} f_a\rho_{out}\left[1-\left(\frac{\rho_{out}}{\rho_k}\right)^{k-1}\right]^{1/2}. \tag{7}$$

Здесь значение надо выразить через известные величины. Так как $\left(\frac{\rho_{\text{out}}}{\rho_k}\right)^k=\frac{p_{\text{out}}}{p_k}=\frac{p_a}{p_k}=\frac{\rho_a RT_0}{\rho_k RT_0}=\frac{\rho_a}{\rho_k}$, то $\rho_{\text{out}}=\rho_k\left(\frac{\rho_a}{\rho_k}\right)^{1/k}$.

Теперь из (7) получаем:

$$G_u=\left(\frac{2kRT_0}{k-1}\right)^{1/2} f_a\rho_a^{1/k}\rho_k^{\frac{k-1}{k}}\left[1-\left(\frac{\rho_a}{\rho_k}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]^{1/2}. \tag{8}$$

Таким образом, искомая зависимость $G(\rho_{\text{k}})$ имеет вид (5) при выполнении условия (3), и вид (8) при выполнении (6).

При подстановке исходных данных получили следующие соотношения:

$$G_s=0{,}5140\rho_k, \tag{9}$$

$$G_u=1{,}6162\rho_k^{0{,}2424}\left[1-\left(\frac{0{,}6655}{\rho_k}\right)^{0{,}2424}\right]^{1/2}. \tag{10}$$

Газ расширяется адиабатически и в трубе, и в отверстии, с начала при давлении p_0 и плотности ρ_0 до выравнивания давления с атмосферным p_a, когда его плотность станет равной p_{out}. Поэтому здесь значение плотности p_{out} заранее известно и равно $\rho_{\text{out}}=\rho_a^{1/k}\rho^{(k-1)/k}$, и формулы понятнее и проще выражать через него вместо p_a.

Так, условие (2) сверхзвукового истечения примет вид:

$$\rho_k\geq\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}}\rho_{\text{out}}. \tag{11}$$

При $\rho_k=\rho_{\text{out}}$ давления перед отверстием и за ним выравниваются и процесс заканчивается.

При выполнении (11) аналогично (5) получаем:

$$G_S=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} f_a\rho_k\sqrt{kRT_k}, \tag{12}$$

и с учётом:

$$T_k=\left(\frac{\rho_k}{\rho_0}\right)^{k-1}T_0, \tag{13}$$

будет:

$$G_S=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}\sqrt{kRT_0}\,\rho_0^{-\frac{k-1}{2}} f_a\rho_k^{\frac{k+1}{2}}. \tag{14}$$

При снижении давления, когда

$$1<\frac{\rho_k}{\rho_{\text{out}}}<\left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}}, \tag{15}$$

аналогично (7) будет:

$$G_u = \left(\frac{2kRT_k}{k-1}\right)^{1/2} f_a \rho_{\text{out}} \left[1 - \left(\frac{\rho_{\text{out}}}{\rho_k}\right)^{k-1}\right]^{1/2} . \tag{16}$$

С учётом (13) аналогично (8) получаем:

$$G_u = \left(\frac{2kRT_0}{k-1}\right)^{1/2} \rho_0^{-\frac{k-1}{2}} f_a \rho_{\text{out}} \rho_k^{\frac{k-1}{2}} \left[1 - \left(\frac{\rho_{\text{out}}}{\rho_k}\right)^{k-1}\right]^{1/2} . \tag{17}$$

Таким образом, искомая зависимость $G(\rho_k)$ имеет вид (14) при выполнении условия (11), и вид (17) при выполнении (15).

Оценим время истечения газа при действии только одного фактора, ограничивающего расход – влияния отверстия. При этом общий объём газа остаётся постоянным: $V = \frac{\pi D^2 L}{4} = \text{const}$, а плотность газа в нём везде одинакова и меняется только со временем, $\rho(\tau)$, за счёт истечения через отверстие с расходом $G = -V\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}\tau}$. Полученные выше формулы (5), (8) или (14), (17) задают явную зависимость расхода от плотности $G(\rho)$. Тогда время истечения τ_i определится интегрированием $\tau_i = V\int\limits_{\rho_{end}}^{\rho_0} \frac{\mathrm{d}\rho}{G(\rho)}$, где $\rho_{end} = \rho_a$ при изотермическом расширении, $\rho_{end} = \rho_a^{1/k}\rho_0^{(k-1)/k} = \rho_{out}$ при адиабатическом.

Процесс происходит несколько по-разному на сверхзвуковом и дозвуковом режимах. Поэтому целесообразно учитывать время этих режимов по отдельности: $\tau_i = \tau_S + \tau_U$, где:

$\tau_S = V\int\limits_{\rho_{k*}}^{\rho_0} \frac{\mathrm{d}\rho}{G_S(\rho)}$ – время истечения на “сверхзвуковом” режиме, $\tau_U = V\int\limits_{\rho_{end}}^{\rho_{k*}} \frac{\mathrm{d}\rho}{G_U(\rho)}$ – на дозвуковом. (18)

Значения $G_S(\rho)$ и $G_u(\rho)$ берутся по (5), (8) или (14), (17), в зависимости от выбранного термического режима.

Очевидно, что сначала при больших давлениях расход газа большой, и процесс идёт быстро. По мере уменьшения давления расход падает и процесс всё замедляется. Можно предположить, что здесь, как во многих физических процессах, приближение к конечному состоянию носит асимптотический характер. Точное конечное состояние не достигается за конечное время: $\tau_U \to \infty$ при приближении нижнего предела интеграла (18) к ρ_{end} из-за $G_U(\rho) \to 0$ при $\rho \to \rho_{end}$.

В случае изотермического расширения согласно (8) можно показать, что функция $G_u(\rho)$ имеет вблизи конца $\rho = \rho_a$ представление вида $G_U(\rho) \sim \Phi(\rho)\sqrt{\rho - \rho_a}$, где функция $\Phi(\rho)$ ограничена и не обращается в ноль. Таким образом, особенность подынтегральной функции в (18) интегрируема, и хотя расход и скорость истечения в конце падают до нуля, полное выравнивание давлений достигается за конечное время.

Аналогичный результат даёт рассмотрение зависимости (17) для случая адиабатического расширения.

4. Результаты расчета

В литературе влияние потерь при истечении из отверстия в стенке по сравнению с идеальным соплом учитывается введением поправочных коэффициентов. На дозвуковом режиме при истечении через отверстие в тонкой плоской стенке существенный вклад даст коэффициент сжатия струи, согласно [6, 7] порядка 0,62 - 0,64. Можно предполагать, что на сверхзвуковом режиме сжатие струи не сказывается, влияет только коэффициент скорости, выражающий потери. В случае ровного круглого отверстия в тонкой стенке такие потери составят несколько процентов [6].

При расчёте истечения из изотермического объёма по формулам (3) – (8) для исходных данных примера получается начальный расход 4,20 кг/с, в момент смены режима – 0,63 кг/с.

Время истечения газа на сверхзвуковом режиме 8106 с = 135 мин 06 с, на дозвуковом 3790 с = 63 мин 10 с, всего 11896 с = 198 мин 16 с.

При расчёте адиабатического истечения по формулам (14) – (17) начальный расход равен 4,20 кг/с, при смене режима (условие (3) как равенство) – 0,79 кг/с.

Время истечения газа на сверхзвуковом режиме 6904 с = 115 мин 04 с, на дозвуковом 3785 с = 63 мин 05 с, всего 10689 с = 178 мин 09 с.

5. Заключение

Видно, что время изотермического истечения больше, чем адиабатического. В том числе из-за большей массы вытекающего газа. Разница времени истечения для рассматриваемого случая составила примерно 10%. Следовательно, разработанная методика расчета истечения природного газа из длинных трубопроводов, находящихся под большим давлением, может быть использована для оценки времени подготовки их к ремонтным работам.

6. Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-417.2019.8.

7. Литература

[1] Ma, L. Quantitative risk analysis of urban natural gas pipeline networks using geographical information systems / L. Ma, L. Cheng, M. Li // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2013. – Vol. 26. – P. 1183-1192.
[2] Осипова, Л.Э. Методы оценки риска эксплуатаций магистральных газопроводов // Известия КГАСУ. – 2017. – Т. 2, № 40. – С. 183-189.
[3] Guo, Y. A novel method of risk assessment based on cloud inference for natural gas pipelines / Y. Guo, X. Meng, T. Meng, D. Wang, S. Liu // Journal of Natural Gas Science and Engineering. – 2016. – Vol.30. – P. 421-429.
[4] Гончаров, М.М. Роль высокочастотных колебаний в детектировании повреждений высокотемпературных трубопроводов / М.М. Гончаров, А.Н. Кондрашов // Математическое моделирование в естественных науках : материалы XXVII Всерос. шк.-конф. молодых ученых и студентов, 2018. – С. 387-390.
[5] Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа: учеб. для вузов / Л.Г Лойцянский – М: Дрофа, 2003. – 840 с.
[6] Айнштейн, В.Г. Процессы и аппараты химической технологии. Общий курс: в 2 кн. / В.Г. Айнштейн, М.К. Захаров, Г.А. Носов – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 1758 с.
[7] Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии – М.: Химия, 1971. – 784 с.

Simulation of gas flow through a hole in long pipelines operating under high pressure

N.D. Yakimov[1], A.I. Khafizova[2], O.S. Dmitrieva[2], E.V. Artemeva[1]

[1]Kazan State Power Engineering University, Krasnoselskaya 51, Kazan, Russia, 420066
[2]Kazan National Research Technological University, Karla Marksa 68, Kazan, Russia, 420015

Abstract. Accidents on pipelines are not uncommon and for their localization it is necessary to determine the exact location of the pipeline rupture. The paper considers the time of gas outflow from a hole in a long pipe under high pressure. A method for calculating the time of natural gas outflow from the pipeline has been developed. A mathematical model of gas flow through the hole is constructed, and the costs of isothermal and adiabatic expansion are determined. A specific example shows the time of gas outflow from the pipeline to prepare the pipeline for repair work.