

Влияние режима истечения газа на расчет объема потерь

Чтобы точнее рассчитать объем технологических потерь природного газа при эксплуатации газораспределительных сетей, важно учитывать режим его истечения. Рассмотрим порядок проведения анализа режима истечения газа и переход не критического режима в критический на примере сброса газа через предохранительно-сбросной клапан.

АВТОР: А.Р. Саликов, исполнительный директор ООО КК «Константа»

При эксплуатации трубопроводов газотранспортными и газораспределительными организациями возникают технологические потери природного газа – следствие негерметичности фланцевых соединений газопровода и оборудования, проведения регламентных работ по обслуживанию оборудования, а также аварий и инцидентов на газопроводах. Вопрос учета таких потерь является очень актуальным. Правильное использование методических указаний и руководящих документов позволяет минимизировать ошибки.

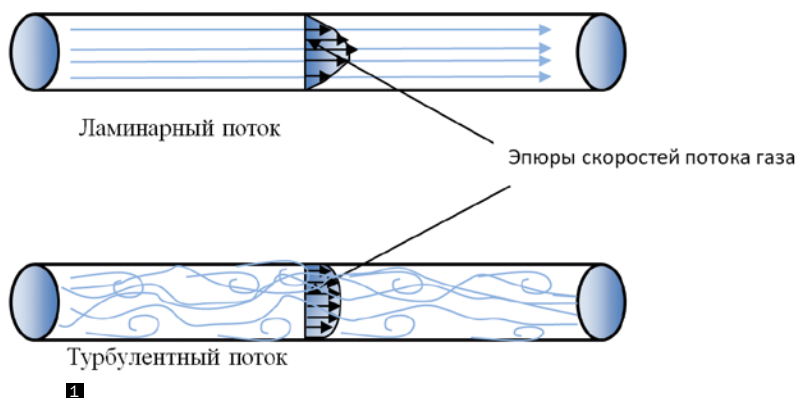
Для расчета объема потерь (выброса) природного газа применяются действующие методики и руководящие документы. Зачастую формулы используются в расчетах без проведения анализа протекающего газодинамического процесса – режима истечения газа. Существуют критические и некритические режимы истечения газа, и при различных режимах объем потерь природного газа должен определяться по разным формулам.

Режим истечения газа обусловлен характером движения его частиц в полости газопровода. Такое течение газа, при котором происходит плавное изменение гидродинамических полей скорости, давления и плотности называется ламинарным. При ламинарном

движении частиц все слои потока движутся параллельно, не перемешиваясь друг с другом, при этом скорость отдельных слоев по сечению поперек потока плавно меняется по параболическому закону от нуля у стенок трубы до наибольшей скорости в ее центре. Турбулентное течение природного газа в газопроводе характеризуется резкими, нерегулярными изменениями полей скорости, давления и плотности. В этом случае частицы потока дополнительно совершают поперечные колебания, что приводит к нарушению параболического закона распределения скоростей по сечению потока из-за образования вихрей.

Число Рейнольдса выражает относительную роль сил инерции и трения

в динамике течения газа по газопроводу. Существует такое значение этого показателя $R_{\text{крит}}^{\text{min}} = 2300$, что течения с меньшим числом Рейнольдса, независимо от степени «начальной возбужденности» потока газа, всегда ламинарные, в течениях с малым значением числа Рейнольдса превалирует роль вязкости, которая сглаживает возникающие небольшие неоднородности. В течениях с большим числом Рейнольдса преобладают силы инерции, которые способствуют возникновению случайных неоднородностей. При $R_{\text{крит}}^{\text{min}} > 2300$ поток газа переходит в турбулентный режим течения. Значение $R_{\text{крит}}$ существенно зависит от гладкости стенок трубы, поэтому для повышения пропускной способности газопроводов применяют трубы с гладким внутренним покрытием.



На рис. 1 изображены два варианта режима течения газа – ламинарный и турбулентный и представлены профили скорости плоскопараллельного течения Куэтта, или течения газа в газопроводе при ламинарном и турбулентном режимах при одинаковом перепаде давлений. Видно, что в турбулентном течении скорость одинакова почти по всему сечению трубы за исключением тонкого слоя вблизи стенок.

Для определения режима истечения газа необходимо сравнить скорость движения газа в газопроводе со скоростью звука в природном газе. Если скорость истечения газа (W_r) больше скорости звука ($W_{звук}$), то режим истечения газа является критическим, если $W_r < W_{звук}$, то режим истечения газа не критический. При анализе режима истечения газа скорость его истечения определяется по формуле Сен-Венана. Почти в каждом случае расчета потерь природного газа проводится данный анализ, кроме расчета потерь газа вследствие негерметичности фланцевых соединений, когда течения газа не критический. Что касается выброса газа через сбросную свечу на магистральном газопроводе – однозначно критический режим истечения газа.

Рассмотрим порядок проведения анализа режима истечения газа при сбросе газа через предохранительно-сбросной клапан (ПСК), например для проведения регламентных работ.

Рассчитаем скорость звука в природном газе, $W_{звук}$, м/с, по формуле:

$$W_{звук} = 18,591 \cdot \left(\frac{T_r \cdot k \cdot Z}{\rho} \right)^{0,5}, \quad (1)$$

где T_r – температура газа, К
 Z – коэффициент сжимаемости газа, определяется по формуле:

$$Z = 1 - ((10,2 \cdot P_a - 6) \cdot (0,00345 \cdot \Delta - 0,000446) + 0,015) \cdot (1,3 - 0,0144 \cdot (T_r - 283,2)) \quad (2)$$

где Δ – относительная плотность газа, кг/м³:

$$\Delta = \rho / 1,2044 \quad (3)$$

Существуют критические и некритические режимы истечения газа, и при различных режимах объем потерь природного газа должен определяться по разным формулам

ρ – абсолютная плотность газа, кг/м³, принимается по данным паспорта качества газа

k – показатель изэнтропы (адиабаты):

$$k = 1,556 \cdot (1 + 0,074 \cdot x_N) - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot T_r \cdot (1 - 0,68 \cdot x_N) -$$

$$0,208 \cdot \rho + \left(\frac{P_a}{T_r} \right)^{1,43} \cdot$$

$$\left[384 \cdot (1 - x_N) \cdot \left(\frac{P_a}{T_r} \right)^{0,8} + 26,4 \cdot x_N \right] \quad (4)$$

где

P_a – абсолютное давление газа, МПа

T_r – температура газа, К

P – абсолютная плотность газа, кг/м³

x_N – молярная составляющая азота (принимается по паспорту качества газа, $x_N = 0,012$)

Расчет скорости истечения газа, W_r , м/с, проводится по формуле Сен-Венана:

$$W_r = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{\rho_\phi} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (5)$$

где

P_1 – абсолютное давление газа (в газопроводе), Па

P_2 – абсолютное атмосферное давление, Па

k – показатель изэнтропы (адиабаты), расчет по формуле (4)

ρ_ϕ – плотность газа фактическая, кг/м³, определяется по формуле:

$$\rho_\phi = \rho \cdot \frac{T_1 \cdot P_a}{T_r \cdot P_{атм} \cdot Z}, \quad (6)$$

где

ρ – абсолютная плотность газа, кг/м³, принимается по данным из паспорта качества газа

$P_{атм}$ – давление приведения, МПа

T_1 – температура приведения, К

P_a – абсолютное давление газа, МПа

T_r – температура газа, К

Z – коэффициент сжимаемости газа

Рассмотрим формулы для вычисления объема выброса газа через ПСК, отраженные в Методических указаниях по расчету валовых выбросов углеводородов (суммарно) в атмосферу в ПАО «Газпром» (СТО ГАЗПРОМ 11-2005 от 25.10.2005).

Если режим истечения газа через ПСК критический ($W_r > W_{звук}$), то объем выброса, $V_{кр}$, м³, определяют по формуле:

$$V_{кр} = 296 \cdot S \cdot P_a \cdot \tau, \quad (7)$$

где

S – площадь сечения трубы (свечи), через которую производится продувка, м²

P_a – абсолютное давление газа перед сечением трубы, через которую производится продувка, кг/см²

τ – продолжительность продувки, с
296 – эмпирический коэффициент, м·см²/кгс

При некритическом режиме истечения газа объем выброса через предохранительно-сбросной клапан ($V_{некрит}$, м³) определяют по формуле:

$$V_{некрит} = 110 \cdot S \cdot P_a \cdot \tau, \quad (8)$$

где

S – площадь отверстия, через которое производится выброс газа, м²

P_a – абсолютное давление газа, кгс/см²

τ – время истечения газа, с

110 – эмпирический коэффициент, м·см²/кгс

Очевидно, что учет режима истечения газа оказывает существенное влияние на расчет объема выброса природного газа. Сравнение формул (7) и (8) показывает, что при одних и тех же значениях площади сечения трубы, давления газа и времени выброса неправильный выбор формулы

(без учета режима истечения газа) приводит к почти трехкратному искажению расчетного объема выброса газа через ПСК.

Рассмотрим, при каких значениях давления газа при сбросе через ПСК наступает критический режим истечения газа. Произведем расчеты по вышеперечисленным формулам при постоянных значениях $d_{\text{свечи}} = 40$ мм, время выброса $\tau = 0,5$ ч, температура газа $T_g = 283\text{K}$, температура воздуха $T_a = 293\text{K}$, абсолютная плотность $\rho = 0,6883$ кг/м³, молярная составляющая азота $\mu = 1,2\%$ и изменяющемся давлении газа в диапазоне от 0,106 МПа до 1,106 МПа. Результаты расчетов объемов выбросов газа через ПСК по формулам (7) и (8) отражены в таблице и на графике.

Из полученных значений видно, что критический режим истечения газа из сбросной свечи наступает уже при абсолютном давлении газа 0,19 МПа и выше. Поэтому в данном случае (при вышеуказанных условно-посто-

янных величинах), расчет объема выброса природного газа до значений 0,19 МПа необходимо осуществлять по формуле (8), а при значениях дав-

организации, так как позволяет достоверно отразить затраты по содержанию сетей, защитить тариф на транспортировку газа, восполняющий

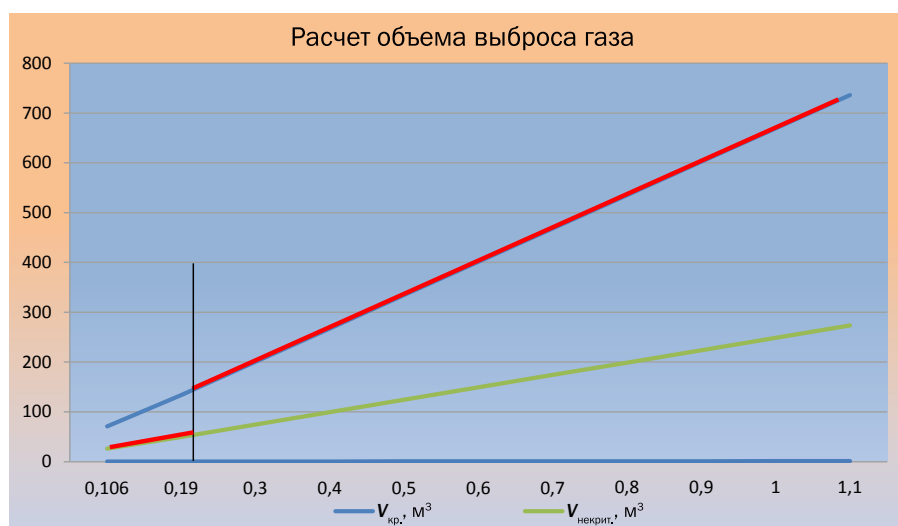
При одних и тех же значениях площади сечения трубы, давления газа и времени выброса неправильный выбор формулы приводит к почти трехкратному искажению расчетного объема выброса газа через ПСК

ления газа выше 0,19 МПа – по формуле (7). Перепад расчетных объемов на границе перехода режимов истечения газа указывает на несовершенство принятых формул (рис. 2).

Учет режима истечения газа при определении объемов потерь природного газа влияет на финансовые результаты деятельности газотранспортной и газораспределительной

реальные потери. При авариях и инцидентах на газопроводах применение формул с учетом режима истечения газа способствует определению объемов выброса газа, максимально приближенных к фактическому объему выброса, и позволяет выставить счет виновнику аварии на возмещение действительных затрат газораспределительной организации.

P_a , МПа	0,106	0,19	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1
$V_{\text{кр.}}$, м ³	70,93	133,84	200,76	267,68	334,60	401,52	468,44	535,36	602,28	669,20	736,12
$V_{\text{некрит.}}$, м ³	26,36	49,74	74,61	99,48	124,34	149,21	174,08	198,95	223,82	248,69	273,56
Режим	$(W_g < W_{\text{звук}})$		$(W_g > W_{\text{звук}})$								



2