

лительных систем / Е. В. Книга, И. О. Жаринов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – №6. – С. 92–98.

9. Копорский, Н. С. Организация вычислительного процесса в многомашинном бортовом вычислительном комплексе / Н. С. Копорский, Б. В. Видин, И. О. Жаринов // Известия вузов. Приборостроение. – 2006. – Т. 49. – №6. – С. 41–50.

10. Парамонов, П. П. Интегрированные бортовые вы-

числительные системы: обзор современного состояния и анализ перспектив развития в авиационном приборостроении / П. П. Парамонов, И. О. Жаринов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – №2. – С. 1–17.

11. Парамонов, П. П. Модели композиционного проектирования авионики / [П. П. Парамонов и др.] // Известия вузов. Приборостроение. – 2010. – Т. 53. – №7. – С. 5–13.

УДК 621.644.8

М. В. Ксензов

*Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор Г. Н. Пурас
Новочеркасская инженерно-мелиоративная академия им. А. К. Кортунова*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ ИСТЕЧЕНИЯ ГАЗА ПРИ ПРОРЫВЕ ГАЗОПРОВОДА

Статья посвящена решению научной задачи, связанной с определением времени истечения газа при прорыве газопровода в результате аварии. Предложена математическая модель для определения времени истечения газа при прорыве газопровода. Приведенный алгоритм расчета времени утечки газа и газовых эмиссий через отверстие может быть использован для практических расчетов времени истечения газа в реальных условиях.

Утечки природного газа, прорыв газопровода, газопровод высокого давления, время истечения газа, аварии на газопроводах.

The article is devoted to the scientific research task, connected with the study of frequency of natural gas leaks in case of the pipeline break as a result of an accident. Additionally, a mathematical model is suggested for determining the gas outflow time during the pipeline break. The adduced time computation algorithm for gas outflow and gas emissions through the vent can be used for practical calculations of gas outflow time in real conditions.

Gas leaks, pipeline break, high pressure pipeline, gas outflow time, pipeline break.

Введение.

На данный момент в Европе существуют две больших организации ("CONCAWE" (The Oil Companies' European Association for Environment, Health and Safety in Refining and Distribution) [7] и "EGIG" (European Gas Incident data Group)) [3], [4], занимающиеся эксплуатацией газо- и нефтепровода. Данные организации основали общества, которые ведут и публикуют обширную статистику аварий и утечек на трубопроводах. Для расчета количества продуктов сгорания и истечения газа необходимым является определение размера прорыва, а также формы отверстия. Данная информация, однако, документирована незначительно и в недостаточном количестве и требует детального анализа. Эти данные можно получить, используя информацию, которая содержится в данных отчетах, как основу.

Основная часть.

Расчет утечек газа из газопровода (для всех видов повреждений) является стандартным расчетом истечения газа из газопровода в атмосферу и определяется с учетом давления газа в сети, а также диаметра

отверстия (утечки). Однако сложным случаем расчета является определение газовых эмиссий в подземном газопроводе. Эти расчеты должны быть произведены с учетом различных факторов (не только давления, размеров и формы газопровода), таких как: глубина залегающего газопровода, термические и физические показатели земли, температура той среды, в которую истекает газ. Все эти факторы обусловили необходимость исследования режима работы сети при прорыве газопровода. Таким образом, была разработана математическая модель, которая описывает определение времени истечения газа при прорыве газопровода. Критический случай для надземного газопровода – это разрыв сварного шва. С частичным разрывом сварного шва образуется отверстие по периметру щели между трубами и принимает форму трещины. Теоретическое решение данной проблемы лежит на основах термодинамики и теории течения газа с учетом двух режимов истечения газа – сверхкритического и подкритического. Проблема истечения газа во времени будет решаться для каждого случая в отдельности (см. рис. 1).

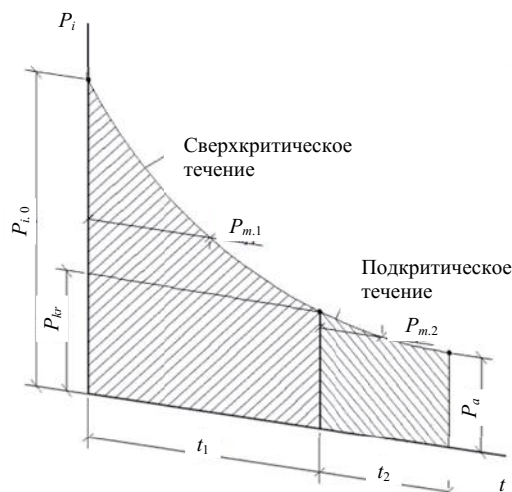


Рис. 1. Изменение давления по времени

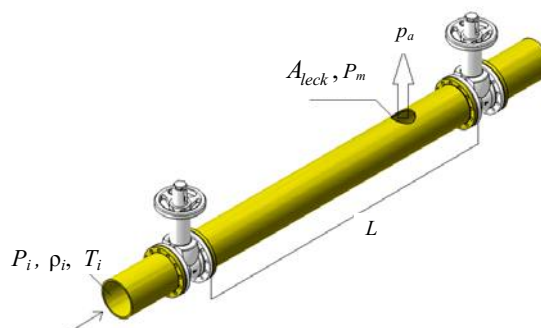


Рис. 2. Газопровод с утечкой

Необходимые величины для определения времени истечения при прорыве газопровода:

D	Диаметр	[мм]
L	Длина	[км]
A_{leak}	Площадь разрыва	[м ²]
$\dot{m}$	Массовый расход	[кг/сек]
P_i	Внутреннее давление	[бар]
P_a	Внешнее давление	[бар]
P_m	Давление в устье (в разрыве), т.е. противоположное давление = P_a	[бар]
$P_{m,1}$	Среднее давление в критическом истечении	[бар]
$P_{m,2}$	Среднее давление в подкритическом истечении	[бар]
ρ_i	Плотность газа	[кг/м ³]
k	Показатель адиабаты	–
Ψ	Функция истечения	–
T_i	Внутренняя температура	[°C]
R	Газовая константа	[кДж/кг·К]
π	Критическое отношение давлений	–
V	Объем газопровода	[м ³]
Z	Реальный газовый фактор	–
w	Скорость истечения	[м/сек]
α_0	Скорость звука	[м/сек]
t_1	Время критического истечения	[сек]
t_2	Время подкритического истечения	[сек]
t_{con}	Временная константа	–

Сверхкритическое истечение. Сверхкритическим течением газа принято считать такое течение газа, при котором достигается наибольший массовый расход, а также при котором скорость истечения достигает скорости звука.

Рассмотрим реальные условия истечения газа (с учетом воздействия коэффициента истечения μ , изменения реального газового фактора $Z_{m,1}$ и показатель адиабаты k_1) для сверхкритического истечения. Изменение массы по времени в газопроводе соответствует массовому расходу:

$$\dot{m}_{krit} = A_{leak} \cdot \rho \cdot w = A_{leak} \cdot \rho \cdot w \cdot \mu.$$

Из общего уравнения состояния реального газа:

$$pV = m \cdot Z \cdot R \cdot T \Rightarrow p = \frac{m}{V} \cdot Z \cdot R \cdot T \Rightarrow \\ \Rightarrow p = \rho \cdot Z \cdot R \cdot T \Rightarrow \rho = \frac{p}{Z \cdot R \cdot T}.$$

Массовый расход можно переформулировать с учетом выше описанной плотности ρ :

$$\dot{m}_{krit} = \frac{P_{kr}}{Z_{m,1} \cdot R \cdot T_i} \cdot A_{leak} \cdot \alpha_0 \cdot \mu, \quad (1)$$

где α_0 – скорость звука, м/с.

Здесь давление в газопроводе больше чем атмосферное давление, критическое истечение в устье соответствует:

$$\alpha_0 = \sqrt{k \cdot Z_{m,1} \cdot R \cdot T_i}.$$

Подставим α_0 в выражение (1):

$$\dot{m}_{krit} = \frac{P_{kr}}{Z_{m,1} \cdot R \cdot T_i} \cdot A_{leak} \cdot \mu \cdot \sqrt{k \cdot Z_{m,1} \cdot R \cdot T_i} \quad (2) \\ Z_{m,1} \cdot T_i = Z_{m,1} \cdot T_i \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)$$

$$\frac{p_{kr}}{p_i} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \Rightarrow p_{kr} = p_i \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Сейчас можем выразить массовый расход с учетом всех единиц:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{krit} &= \frac{p_i \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}}{R \cdot Z_{m,1} \cdot T_i \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)} \cdot A_{leck} \cdot \mu \cdot \sqrt{k \cdot R \cdot Z_{m,1} \cdot T_i \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)} \\ \Rightarrow \dot{m}_{krit} &= \frac{p_i}{R \cdot Z_{m,1} \cdot T_i} A_{leck} \cdot \mu \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \cdot \sqrt{k \cdot R \cdot Z_{m,1} \cdot T_i}. \end{aligned} \quad (3)$$

С учетом закона сохранения массы:

$$\dot{m}_{krit} dt = -V \cdot d\rho \Rightarrow dt = \frac{-V \cdot d\rho}{\dot{m}_{krit}}.$$

Если

$$d\rho = \frac{dp}{Z_{m,1} \cdot R \cdot T_i},$$

тогда

$$dt = - \frac{V}{\dot{m}_{krit} \cdot Z_{m,1} \cdot R \cdot T_i} \cdot dp. \quad (4)$$

Если выражение (2) переформулировать:

$$\begin{aligned} \dot{m}_{krit} \cdot R \cdot Z_{m,1} \cdot T_i &= \\ &= p_i \cdot A_{leck} \cdot \mu \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \cdot \sqrt{k \cdot R \cdot Z_{m,1} \cdot T_i}, \end{aligned} \quad (5)$$

тогда можно подставить сравнение (5) в формулу (4):

$$\begin{aligned} dt &= - \frac{V}{\underbrace{A_{leck} \cdot \mu \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \cdot \sqrt{k \cdot R \cdot Z_{m,1} \cdot T_i}}_{t_{con,1}}} \cdot \frac{dp}{p} \Rightarrow \\ \Rightarrow t_{con} &= - \frac{V}{\underbrace{A_{leck} \cdot \mu \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \cdot \sqrt{k \cdot R \cdot Z_{m,1} \cdot T_i}}_{\text{все переменные остаются неизменными}}} \Rightarrow \\ &\Rightarrow dt = -t_{con,1} \cdot \frac{dp}{p}. \end{aligned} \quad (6)$$

Можно проинтегрировать от внутреннего давления p_i ко времени $t_0 = 0$ и до критического давления p_{kr} ко времени t_1

$$\int_{t_2}^{t_1} dt = -t_{con,1} \cdot \int_{p_i}^{p_{kr}} \frac{dp}{p},$$

где рассчитанное давление с учетом критического отношения давлений составляет

$$p_{kr} = p_a \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{-\frac{k}{k-1}}.$$

Расчет времени t_1 , которое потребуется для того, чтобы давления упало до уровня критического отношения давлений, определяется

$$\begin{aligned} -\frac{t_1}{t_{con,1}} &= \ln \frac{p_{kr}}{p_i} \\ t_1 &= -t_{con,1} \cdot \ln \frac{p_{kr}}{p_i} \end{aligned} \quad (7)$$

и

$$e^{-\frac{t_1}{t_{con,1}}} = \frac{p_{kr}}{p_i} \Rightarrow p_{kr}(t) = p_i \cdot e^{-\frac{t_1}{t_{con,1}}}.$$

Определение реального газового фактора $Z_{m,1}$:

$$\begin{aligned} Z_{m,1} &= 1 - 3,52 \cdot p_r \cdot \exp(-2,260 \cdot T_r) + \\ &+ 0,274 \cdot p_r^2 \cdot \exp(-1,878 \cdot T_r), \end{aligned}$$

где p_r – приведенное давление = $\frac{p_{m,1}}{p_{pc}}$, бар; T_r –

приведенная температура = $\frac{T_i}{T_{pc}}$, К.

В данном выражении неизвестно только среднее давление $p_{m,1}$, которое может быть определено:

$$\begin{aligned} p_{m,1} &= \int_0^{t_1} \frac{p_{kr}(\tau) d\tau}{t_1} \\ \int_0^{t_1} p_{kr}(\tau) d\tau &= \int_0^{t_1} p_i \cdot e^{-\frac{\tau}{t_{con}}} d\tau = p_i \cdot \int_0^{t_1} e^{-\frac{\tau}{t_{con}}} d\tau = \\ &= -t_{con} \cdot p_i \cdot e^{-\frac{\tau}{t_{con}}} \Big|_0^{t_1} = -t_{con} \cdot p_i \cdot \left(e^{-\frac{t_1}{t_{con}}} - e^{-\frac{0}{t_{con}}} \right) = \\ &= -t_{con} \cdot \left(p_i \cdot e^{-\frac{t_1}{t_{con}}} - e^0 \right) = -t_{con} \cdot (p_{kr}(t) - p_i) \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\Rightarrow p_{m,1} = \frac{-t_{con} \cdot (p_{kr}(t) - p_i)}{t_1}.$$

Определение показателя адиабаты k_1 .

$$k_1 = 1,556 \cdot (1 + 0,074 \cdot x_{n2}) - 3,9 \cdot 10^{-4} \cdot T_i \cdot (1 - 0,68 \cdot x_{n2}) - 0,208 \cdot \rho_{st} + \left(\frac{p_i}{T_i}\right)^{1,43} \cdot \left[2,261 \cdot (1 - \frac{p_i}{T_i}^{0,8} + 0,981 \cdot x_{n2}\right],$$

где ρ_{st} – плотность в стандартном состоянии равная 0,708 кг/м³; x_{n2} – количество вещества = 0,005.

С учетом $Z_{m,1}$ и k_1 может быть рассчитано время t_1 (7), t_{con} (6) и массовый критический расход $\dot{m}_{krit}$ (3).

Подкритическое истечение. Рассмотрим реальные условия (с учетом воздействия коэффициента истечения μ , изменения реального газового фактора $Z_{m,2}$) для подкритического истечения. Изменение массы по времени в газопроводе соответствует массовому расходу:

$$\dot{m}_{unterkr} = A_{leek} \cdot \rho \cdot w = A_{leek} \cdot \rho \cdot w \cdot \mu.$$

Из общего уравнения состояния реального газа:

$$pV = m \cdot Z \cdot R \cdot T \Rightarrow p = \frac{m}{V} \cdot Z \cdot R \cdot T \Rightarrow \\ \Rightarrow p = \rho \cdot Z \cdot R \cdot T \Rightarrow \rho = \frac{p}{Z \cdot R \cdot T}.$$

С учетом закона о сохранении массы:

$$\dot{m}_{unterkr} dt = -V \cdot dp \Rightarrow d\rho = \frac{d\rho}{Z_{m,2} \cdot R \cdot T_i}.$$

В случае, если

$$\dot{m}_{unterkr} dt = -V \cdot \frac{dp}{Z_{m,2} \cdot R \cdot T_i},$$

тогда

$$\dot{m}_{unterkr} \cdot Z_{m,2} \cdot R \cdot T_i \cdot dt = -V \cdot dp.$$

Приближение I для массового расхода из [5], [6] для реальных условий:

$$\dot{m}_{unterkr} = \mu \cdot A_{leek} \cdot \sqrt{\frac{2}{Z_{m,2} \cdot R \cdot T_i}} \cdot \sqrt{p_a \cdot (p_i - p_a)}. \quad (8)$$

После объединения двух вышеописанных выражений получаем:

$$\mu \cdot A_{leek} \cdot \sqrt{\frac{2}{Z_{m,2} \cdot R \cdot T_i}} \cdot \sqrt{p_a \cdot (p_i - p_a)} \cdot Z \cdot R \cdot T \cdot dt = -V \cdot dt$$

$$\mu \cdot A_{leek} \cdot \sqrt{2 \cdot Z_{m,2} \cdot R \cdot T_i} \cdot \sqrt{p_a \cdot (p_i - p_a)} \cdot dt = -V \cdot dp$$

$$dt = - \frac{V}{\underbrace{\mu \cdot A_{leek} \cdot \sqrt{2 \cdot Z_{m,2} \cdot R \cdot T_i}}_{t_{con,2}}} \cdot \frac{dp}{\sqrt{p_a \cdot (p_i - p_a)}}. \quad (9)$$

Тогда можно выразить $t_{con,2}$:

$$t_{con,2} = \frac{V}{m \cdot A_{leek} \cdot \sqrt{2 \cdot Z_{m,2} \cdot R \cdot T_i}}. \quad (10)$$

Выражение (9) может быть проинтегрировано по критическому давлению p_{kr} ко времени t_0 до давления p_a ко времени t_2 :

$$\int_{t_0=0}^{t_2} dt = \int_{p_{kr}}^{p_a} -t_{con,2} \cdot \frac{dp}{\sqrt{p_a \cdot (p_i - p_a)}}, \\ t_2 = -t_{con,2} \cdot \frac{2}{p_a} \cdot \left(\sqrt{p_a \cdot (p_i - p_a)} - \sqrt{p_a \cdot (p_{kr} - p_a)} \right), \\ - \frac{t_2 \cdot p_a}{2 \cdot t_{con,2}} = \left(\sqrt{p_a \cdot (p_i - p_a)} - \sqrt{p_a \cdot (p_{kr} - p_a)} \right) \cdot 1 \\ p_a \cdot (p_i - p_a) = \left(\sqrt{p_a \cdot (p_{kr} - p_a)} - \frac{t_2 \cdot p_a}{2 \cdot t_{con,2}} \right)^2, \\ p_a \cdot p_i = p_a^2 + \left(\sqrt{p_a \cdot (p_{kr} - p_a)} - \frac{t_2 \cdot p_a}{2 \cdot t_{con,2}} \right)^2.$$

Если представить изменение давления во время подкритического истечения как функцию по времени

$$p(t) = \frac{p_a^2 + \left(\sqrt{p_a \cdot (p_{kr} - p_a)} - \frac{t_2 \cdot p_a}{2 \cdot t_{con,2}} \right)^2}{p_a}$$

или

$$p_{unt}(t) = \left(\frac{1}{p_a} \right) \cdot \left(p_a^2 + \left(\sqrt{p_a \cdot (p_{kr} - p_a)} - \frac{t_2 \cdot p_a}{2 \cdot t_{con,2}} \right)^2 \right),$$

тогда

$$t_2 = -t_{con,2} \cdot \frac{2}{p_a} \cdot \left(-\sqrt{p_a \cdot (p_{kr} - p_a)} \right). \quad (11)$$

Определение реального газового фактора $Z_{m,2}$:

$$Z_{m,2} = 1 - 3,52 \cdot p_r \cdot \exp(-2,260 \cdot T_r) + 0,274 \cdot p_r^2 \cdot \exp(-1,878 \cdot T_r),$$

где p_r – приведенное давление = $\frac{p_{m,2}}{p_{pc}}$, бар; T_r – приведенная температура = $\frac{T_i}{T_{pc}}$, К.

В выражении неизвестным является только среднее давление $p_{m,2}$, которое может быть определено:

$$p_{m,2} = \int_0^{t_2} \frac{p_{unk}(\tau) d\tau}{t_2}.$$

С учетом $Z_{m,2}$ можно определить время t_2 (11) $t_{con,2}$ (10) и подкритической массовый расход $\dot{m}_{unterkr}$ (8).

Просуммировав t_1 и t_2 , получим общее время истечения газа при прорыве сети.

Выводы.

Таким образом, можно сделать вывод, что для расчета количества продуктов сгорания и истечения газа необходимым является определение размера прорыва, а также формы отверстия, которые были классифицированы в группы.

УДК 662.6/9

В. К. Любов, А. Н. Попов, П. В. Малыгин, Е. И. Попова
Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА В ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВКАХ МИНИ-ТЭЦ

Целью данной работы являлось комплексное энергетическое обследование теплогенерирующей установки мини-ТЭЦ, оборудованной двумя паровыми котлоагрегатами мощностью по 9,5 МВт и противодавленческой турбиной мощностью 3,3 МВт. В топках котлоагрегатов, оборудованных наклонно-переталкивающими решетками, реализована трехступенчатая схема сжигания, обеспечившая эффективное энергетическое использование кородеревесных отходов. Выполнен анализ конструктивных особенностей установленного теплогенерирующего оборудования, определены составляющие теплового баланса, исследованы выбросы оксидов азота и оксида углерода. Особое внимание уделено выбросам сажевых частиц, оказывающих сильное влияние на экологическую обстановку Арктических территорий.

Котельная установка, топливо, вредные вещества, выбросы сажевых частиц, топка, система автоматики, золоуловитель, потери тепла, первичный и вторичный воздух.

The aim of this work is a comprehensive energy examination of the heat generators of mini-CHP equipped with two steam boilers with 9.5 MW capacity and backpressure turbine with 3.3 MW capacity. The furnaces of boiler installations were equipped with reciprocating grates. A three-stage scheme of combustion which ensures the effective use of wood wastes energy was implemented. The article provides: performed analysis of features design of heat generating equipment components; thermal balance components definition; emissions of nitrogen oxides and carbon monoxide examination. Special priority was given to the emissions of black carbon ash particles that have a particularly high impact on the environment of arctic territories.

Boiler installation, fuel, harmful substances, emissions of black carbon, furnace, automation system, ash collector, heat losses, primary and secondary air.

Введение.

Одним из направлений снижения выбросов вредных веществ в атмосферу установками топливно-энергетического комплекса следует считать замену невозобновляемых топлив – углей и мазутов – на возобновляемые виды биотоплива. Поэтому в индустриально развитых странах для уменьшения воздействия «парниковых» газов на климат планеты актив-

Приведенный алгоритм расчета времени утечки газа и газовых эмиссий через отверстие может быть использован для практических расчетов времени истечения газа в реальных условиях.

Литература

1. Капцов, И. И. Сокращение потерь газа на магистральных газопроводах / И. И. Капцов. – М., 1988.
2. ОАО «Росгазификация». Головной научно-исследовательский проектный институт. Методика по расчету удельных показателей загрязняющих веществ в выбросах (сбросах) в атмосферу (водоемы) на объектах газового хозяйства. – М., 1996.
3. 7-th EGIG-report. 1970–2007, Gas Pipeline Incidents, Doc. Number EGIG 08. TV-B. 0502. – 2008. – December.
4. 8-th EGIG-report. 1970–2010, Gas pipeline incidents, Doc. Number. EGIG 11. R. 0402 (version2). – 2011. – December.
5. Mischner, J. Sonderdruck. Durchflusscharakteristika von Stellgliedern / J. Mischner, Y. Pan, K.-H. Pflüger. – Teil I. – 2009. – № 3.
6. Mischner, J. Zur Berechnung des Druckverlaufs in Gasrohrleitungen / J. Mischner. – 2009. – № 5.
7. Statistical summary of reported spillages in 2011 and since 1971, CONCAWE. – Brussels, 2013. – April.

но поощряется замена ископаемых топлив биотопливом. Наиболее эффективным направлением энергетического использования побочных продуктов лесопильного производства является строительство мини-ТЭЦ на древесных отходах [1], [2], [4]. При этом возможны различные технологические схемы реализации данного направления, требующего значительных капитальных затрат, но позволяющего реализо-