

RESEARCH AND ANALYSIS OF EMERGENCY NATURAL GAS LEAK MODELS

Martin Boyadjiev, Stefan Vuchev, Lachezar Georgiev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; martinb@mgu.bg; s.vuchev@mgu.bg; lachezar.georgiev@mgu.bg

ABSTRACT. This paper presents an in-depth analysis of technical loss of natural gas arising as a result of emergency situations in gas distribution networks. The focus is on the methodology for calculating the mass and volume flow rate in the event of a pipeline breach. The physical foundations of the leak are considered in different thermodynamic regimes: critical (sonic) and subcritical (subsonic). The article integrates regulatory requirements for the calculation of technological costs and practical examples for loss calculation. The results emphasise the importance of rapid localisation and the environmental consequences of methane emissions.

Key words: leaks, methane, loss, gas pipeline.

ИЗСЛЕДВАНЕ И АНАЛИЗ НА МОДЕЛИ ЗА АВАРИЙНО ИЗТИЧАНЕ НА ПРИРОДЕН ГАЗ

Мартин Бояджиев, Стефан Вучев, Лъчезар Георгиев

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ Настоящата работа представя задълбочен анализ на техническите загуби на природен газ, възникващи в резултат на аварийни ситуации в газоразпределителните мрежи. Основният фокус е върху методологията за изчисляване на масовия и обемния дебит при пробив на целостта на тръбопровода. Разгледани са физическите основи на изтичането при различни термодинамични режими – критичен (звуков) и подкритичен (дозвуков). В статията са интегрирани нормативни изисквания за разчет на технологичните разходи и практически примери за изчисляване на загубите. Резултатите подчертават значението на бързата локализация и екологичните последици от метановите емисии.

Ключови думи: утечки, метан, загуби, газопровод.

Въведение

Газоразпределителните мрежи са гръбнакът на енергийната инфраструктура в урбанизираните територии. Осигуряването на тяхната безаварийна работа е комплексна задача, която включва проектиране, поддръжка и мониторинг. Въпреки съвременните технологии, аварията, причинени от външна намеса, корозия или дефекти в материалите, остават неизбежен фактор.

Аварийното изтичане на природен газ води не само до директни финансови загуби за оператора, но и до сериозни рискове за безопасността на населението и околната среда. Метанът, основната съставка на природния газ, е мощен парников газ с висок потенциал за глобално затопляне (GWP). Ето защо, прецизното остойностяване на техническите загуби е от съществено значение за енергийния баланс и екологичната отчетност на предприятията.

Класификация на загубите в газоразпределителните мрежи

Съгласно утвърдената методология за разчет на технологичните разходи и техническите загуби на ПГ в разпределителните мрежи, загубите се класифицират по следния начин:

- **Технологични разходи:** Количества газ, необходими за поддържане на експлоатационната годност на мрежата. Те включват:
 - продухване на газопроводи при пуск и ремонт;
 - газ за работа на пневматично оборудване;
 - продухване на филтърни елементи в ГРП и ГИС.
- **Технически загуби:** Количества, които се изпускат в атмосферата поради нарушена херметичност. Те се делят на:

- **загуби от неплътности:** постоянни, ниско-дебитни изтичания от фланци, уплътнения и резбови съединения.
- **аварийни загуби:** внезапни и интензивни изтичания при разрушаване на стената на тръбопровода.

Общият обем на техническите загуби за определен период се определя като разлика между количеството постъпил газ в мрежата и количеството отчетен газ при потребителите, след корекция с технологичните разходи и температурните разлики

Теоретични основи на аварийното изтичане

Процесът на изтичане на газ през отвор в тръбопровод под налягане се подчинява на законите на газовата динамика. Определящ фактор е отношението между абсолютното налягане вътре в тръбопровода (P_1) и атмосферното налягане (P_2).

Режими на движение

За определяне на режима на изтичане се използва критичното отношение на наляганията (β_{cr}), което за природния газ ($k = 1.31$) се изчислява по формула (1):

$$\beta_{cr} = [2/(K + 1)]^{k/(k-1)} \approx 0,544 \quad (1)$$

В зависимост от текущото налягане P_1 , различаваме два режима таблица 1.

При газоразпределителни мрежи средно налягане (над 0.2 МПа абсолютно), изтичането почти винаги е в критичен режим в началния етап на аварията.

Таблица 1: зависимост от текущото налягане P_1

Режим на изтичане	Условие	Характеристики
Критичен (звук)	$P_2 / P_1 \leq \beta_{cr}$	Скоростта на изтичане в сечението на отвора достига скоростта на звука. Дебитът зависи само от P_1 .
Подкритичен (до-звук)	$P_2 / P_1 > \beta_{cr}$	Скоростта е по-ниска от звуковата. Дебитът зависи от разликата в наляганията $P_1 - P_2$.

Методика за изчисляване на изтеклото количество

Общото количество газ ($V_{ав}$), загубено при авария, се формира от две части $V_{ав} = V_1 + V_2$, където:

- V_1 : Обемът газ, изтекъл от момента на пробива до момента на пълното изолиране на участъка чрез спирателна арматура. $V_1 = Q_m \times \tau$, където Q_m е средният дебит, а τ е времето за локализация.
- V_2 : Обемът газ, останал в изолирания участък на газопровода, който се изпразва през пробива до изравняване с атмосферното налягане.

Изчисление на дебита при критичен режим

Масовият дебит M в kg/s се определя чрез формула (2)

$$M = \mu * f * P_1 * \sqrt{\left[\left(\frac{K}{R \cdot T_1}\right) * \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{K+1}{K-1}}\right]} \quad (2)$$

където:

μ – коефициент на дебита (зависи от формата на отвора, обикновено 0.6 – 0.85);

f – площ на пробива в m^2 ;

R – газова константа за ПГ ($\approx 518.3 \text{ J/kg.K}$);

T_1 – абсолютна температура на газа в K.

Практически пример и решения

Разглеждаме аварийен пробив на стоманен газопровод със следните параметри (таблица 2):

– налягане в мрежата: $P_{раб} = 0.4 \text{ MPa}$ (излишно); $P_1 = 0.5013 \text{ MPa}$ (абсолютно).

– диаметър на пробива: $d = 25 \text{ mm}$.

– време за локализация: 30 минути (0.5 h).

Този пример илюстрира огромните загуби дори при малък по размер пробив. Само за половин час се губи обем газ, достатъчен за отоплението на няколко домакинства за цял сезон.

Таблица 1: Разглеждане на аварийен пробив

Параметър	Формула	Резултат
Площ на пробива f	$\pi \times d^2 / 4$	$4.91 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Режим на изтичане	$P_2 / P_1 = 0.1013 / 0.5013$	0.202 (Критичен режим)
Обемен дебит Q	базиран на термодинамичния модел	$\sim 1250 \text{ m}^3/\text{h}$

Анализ на влияещите фактори

За целите на статията бе направен сравнителен анализ на факторите, определящи мащаба на техническите загуби:

1. **Работно налягане:** Дебитът при критичен режим е право пропорционален на налягането. Повишаването на налягането в ГРМ с цел по-голям капацитет автоматично увеличава риска от големи загуби при авария.
2. **Време за реакция:** Това е единственият фактор, който операторът може да контролира директно след възникване на събитието. Внедряването на системи за отдалечен мониторинг (SCADA) и автоматични спирателни кранове е ключово.
3. **Геометрия на отвора:** Реалните пробиви рядко са правилни кръгове. Използването на коефициента μ коригира изчисленията за реални условия (напр. пукнатини по дължина на шева).

Екологичен и икономически отпечатък

От екологична гледна точка изтичането на метан е многократно по-вредно от изгарянето му. При изтичане, всеки килограм метан има затоплящ ефект, равен на около 28-36 kg CO_2 . Икономическите загуби включват не само стойността на неосъществената продажба на газа, но и разходите за аварийната група, ремонта на съоръженията и възможните екологични глоби.

Екологичен отпечатък и климатично въздействие

В контекста на съвременните климатични политики, аварийните изтичания на природен газ вече не се разглеждат само като икономическа загуба, но и като сериозен екологичен инцидент.

Глобално затопляне и потенциал на метана. Метанът (CH_4), който е основен компонент на природния газ (над 90%), има специфични термодинамични и химични свойства, които го правят изключително агресивен парников газ. Неговият потенциал за глобално затопляне (GWP — Global Warming Potential) е:

- 28-36 пъти по-висок от този на CO_2 за период от 100 години.

- над 80 пъти по-висок в краткосрочен план (20 години).

Това означава, че дори малки по обем аварийни изтичания имат непропорционално голям принос към въглеродния отпечатък на газоразпределителните дружества.

Новият Метанов регламент на ЕС. Съгласно приетия през 2024 г. Регламент на ЕС за намаляване на метановите емисии, операторите на ГРМ вече са задължени да прилагат строги протоколи за **LDAR (Leak Detection and Repair)**. Аварийните изтичания трябва не само да бъдат изчислявани, но и докладвани по стриктни нива (Source-level reporting), което прави методиката, описана в тази статия, още по-значима за практиката.

Съвременни методи и технологии за откриване на изтичания

Бързината на локализиране на аварията е основният фактор, който определя общия обем на техническите загуби. Съвременните технологии предлагат решения, които значително съкращават времето.

Дистанционни лазерни методи (LIDAR)

Тези системи използват лазерна спектроскопия за откриване на метан от разстояние.

- **Принцип:** Лазерният лъч се настройва на специфичната дължина на вълната, абсорбирана от метана.
- **Предимство:** Позволяват проверка на труднодостъпни места и надземни пресичания без нужда от директен достъп на екипа до зоната на изтичане.

Акустична емисия и сензори

При високо и средно налягане, изтичането на газ през пробив генерира характерен ултразвуков шум поради турбулентността на потока.

- **Технология:** Преносими или стационарни акустични детектори улавят тези честоти и могат точно да локализират мястото на пробива, дори ако газопроводът е вкопан под земята.

Използване на дроне (UAV) и мобилни лаборатории

Модерните оператори в България започват да внедряват мобилни системи, монтирани на автомобили или дроне:

- **Picarro/CRDS системи:** Изключително чувствителни анализатори, които могат да открият повишена концентрация на метан в частици на милиард (ppb) при движение със скорост от 50 км/ч.
- **Сателитен мониторинг:** Макар и все още скъп за ГРМ, той се превръща в стандарт за откриване на "супер-емитери" (масивни аварийни изтичания) по преносната мрежа.

Дискусия и икономическа обосновка

Инвестицията в тези технологии се оправдава чрез намаляване на стойността на изгубения газ и спестяване от екологични такси. Когато комбинираме физическия модел на изтичане (от раздел 3 и 4) с бърза детекция (раздел 8), можем да изчислим **ROI (възвращаемост на инвестицията)** за всяка внедрена система за мониторинг.

Заклучение

Точното определяне на техническите загуби от аварийно изтичане е фундаментално за подобряване на енергийната ефективност на ГРМ. Представената методология и физическите модели осигуряват надежден инструмент за инженерите в сектора. Инвестициите в по-бързи системи за детекция и модернизация на остарелите участъци от мрежата са единственият път към намаляване на тези нежелани ефекти.

Литература

- Сафонов, В. С. и др. (2005). *Теория и практика анализа рисков в газовой промышленности*. Москва: ВНИИГАЗ, 2005/5.
- Методология за разчет на технологични разходи и технически загуби на ПГ в разпределителните мрежи. Практическо приложение и решения на задачи по газоразпределителни системи - учебни материали на МГУ.
- Регламент 1787 (ЕС) относно намаляването на емисиите на метан в енергийния сектор.
- СТО Газпром 2-2.3-351-2009. *Методические указания по проведению анализа риска для опасных производственных объектов газотранспортных предприятий ОАО „Газпром“*. Москва: ВНИИГАЗ, 2009.
- AGA Operations Roundtables: Технически доклади за управление на риска и интегритет на тръбопроводите (Pipeline Integrity Management).
- International Gas Union. *Global Gas Report*. London: IGU, 2023
- IGU. *Mitigating Methane Emissions in the Natural Gas Sector*. Technical Report, 2021.
- MARCOGAZ. *Technical Report on Methane Emissions: Assessment of Methane Emissions for the European Gas Midstream Sector*. Brussels: MARCOGAZ, 2019.
- MARCOGAZ. *Survey on Methane Emissions: Gas Transmission and Distribution Systems*. Technical Note, 2022.
- Methane Emissions Mitigation Strategies: AGA публикува насоки за минимизиране на аварийното изтичане чрез модернизация на инфраструктурата.