

INTEGRATION OF LEAK DETECTION SYSTEMS IN HYDROGEN TRANSPORT NETWORKS: TECHNOLOGIES, CHALLENGES, AND PERSPECTIVES

Viliyan Yanakiev

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: qnakiev91@abv.bg

ABSTRACT. Hydrogen is considered a key energy carrier for a future low-carbon economy. With the growing development of hydrogen infrastructure, there is an increasing need for reliable monitoring systems and early leak detection in transportation networks. This study examines modern technologies for leak detection in long pipeline systems and their applicability to hydrogen transport. Methods, such as mass balance analysis, acoustic sensors, distributed fibre-optic sensing, and intelligent internal inspection devices, are analysed. Particular attention is given to the integration of these technologies into remote control and monitoring systems like SCADA.

Key words: hydrogen, automated control, energy efficiency.

ИНТЕГРИРАНЕ НА СИСТЕМИ ЗА ОТКРИВАНЕ НА ТЕЧОВЕ ВЪВ ВОДОРОДНИ ТРАНСПОРТНИ МРЕЖИ: ТЕХНОЛОГИИ, ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА И ПЕРСПЕКТИВИ

Вилиян Янакиев

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

РЕЗЮМЕ. Водородът се разглежда като ключов енергиен носител за бъдеща нисковъглеродна икономика. С нарастващото развитие на водородна инфраструктура, възниква необходимост от надеждни системи за мониторинг и ранно откриване на течове в транспортните мрежи. Настоящото изследване разглежда съвременни технологии за откриване на течове в дълги тръбопроводни системи и тяхната приложимост при транспортиране на водород. Анализирани са методи като масов баланс, акустични сензори, оптични влакна за разпределено наблюдение и интелигентни вътрешни инспекционни устройства. Специално внимание се отделя на интеграцията на тези технологии в системи за дистанционно управление и мониторинг като SCADA.

Ключови думи: водород, автоматизирано управление, енергийна ефективност.

Въведение

През последните години водородът се утвърждава като един от най-перспективните енергийни носители за постигане на глобалните цели за декарбонизация и устойчиво развитие. В контекста на енергийния преход към нисковъглеродни технологии, водородът предлага значителен потенциал за намаляване на емисиите на парникови газове в сектори като енергетика, транспорт и тежка индустрия. Развитието на водородна икономика изисква изграждането на надеждна инфраструктура за производство, съхранение и транспорт на водород.

Един от ключовите елементи на тази инфраструктура са тръбопроводните системи, които позволяват ефективното транспортиране на големи количества газ на дълги разстояния. Въпреки това, транспортирането на водород поставя специфични технически и експлоатационни предизвикателства. Поради малкия размер на молекулата и високата му дифузионна способност, водородът е по-податлив на изтичане в сравнение с традиционните газове като природният газ. Това налага внедряването на високочувствителни и надеждни системи за мониторинг и ранно откриване на течове.

Съвременните технологии за наблюдение на тръбопроводни системи включват разнообразни методи, като анализ на масов баланс, акустични сензори, системи за разпределено наблюдение чрез оптични влакна и интелигентни вътрешни инспекционни устройства. Интеграцията на тези технологии със системи за дистанционно управление и мониторинг позволява непрекъснат контрол върху състоянието на тръбопровода и бърза реакция при възникване на аномалии.

Настоящото изследване има за цел да анализира съвременните технологии за откриване на течове в тръбопроводни системи и да оцени тяхната приложимост при транспортиране на водород. Специално внимание се отделя на ефективността, точността и възможностите за интеграция на тези технологии в бъдещите водородни енергийни мрежи.

Преглед

Нарастващият интерес към водорода като чист енергиен носител води до засилени научни изследвания в областта на неговото производство, съхранение и транспортиране. Водородът се разглежда като ключов елемент в прехода към нисковъглеродна енергийна система, тъй като има потенциала значително да намали емисиите на парникови газове в сектори като индустрията, транспорта и производството на електроенергия. В резултат на това, развитието на надеждна инфраструктура за транспорт на водород се превръща във важен фокус както на научните изследвания, така и на индустриалните приложения.

Транспортирането на водород чрез тръбопроводи се счита за един от най-ефективните и икономически изгодни методи за пренос на големи количества газ на дълги разстояния. В много случаи съществуващата инфраструктура за природен газ може потенциално да бъде адаптирана за транспортиране на водород, което би могло значително да намали разходите за изграждане на изцяло нови мрежи. Въпреки това, физичните свойства на водорода поставят редица технически предизвикателства. Поради малкия размер на молекулата и високата му

дифузионна способност, водородът има по-голяма склонност към изтичане в сравнение с традиционния природен газ. Освен това водородът може да предизвика процеси като водородна крехкост на материалите, което води до отслабване на металните конструкции и повишава риска от повреди в тръбопроводите.

Поради тези предизвикателства внедряването на надеждни системи за мониторинг и откриване на течове е от съществено значение за безопасната експлоатация на водородните тръбопроводи. Разработени са различни технологии за тази цел. Един от най-широко използваните подходи е методът на масовия баланс, при който течовете се откриват чрез сравнение на количеството газ, което влиза и излиза от тръбопроводната система. Въпреки че този метод е сравнително прост и икономически ефективен, възможностите му за точно локализиране на теча са ограничени.

По-съвременни решения включват акустични системи за мониторинг, които откриват звуковите вълни, генерирани при изтичане на газ от тръбопровода. Друга перспективна технология е разпределеното наблюдение чрез оптични влакна, което позволява непрекъснат контрол върху температурата, вибрациите и акустичните сигнали по цялата дължина на тръбопровода. Освен това широко се използват и вътрешни инспекционни устройства като Smart Pig, които позволяват откриването на корозия, пукнатини и други структурни дефекти в тръбопроводите.

Съвременните системи за мониторинг на тръбопроводи често интегрират няколко метода за откриване на течове в централизирани платформи за управление и наблюдение като SCADA. Тази интеграция позволява наблюдение в реално време, бързо откриване на аномалии и повишаване на оперативната безопасност.

Като цяло съществуващите научни изследвания подчертават значението на комбинирането на различни технологии за мониторинг, за да се осигури надеждно и ефективно откриване на течове във водородните транспортни мрежи. Подобни интегрирани решения се очаква да играят ключова роля в развитието на бъдещата водородна инфраструктура.

Методология

Настоящото изследване използва аналитичен подход за оценка на съвременните технологии за откриване на течове в тръбопроводни системи, предназначени за транспортиране на водород. Методологията се основава на сравнителен анализ на различни методи за мониторинг и детекция на течове, като се разглеждат тяхната ефективност, точност и приложимост при водородни транспортни мрежи.

Метод на масовия баланс

Методът на масовия баланс е един от най-широко използваните подходи за откриване на течове в газопроводни системи. Той се базира на принципа на запазване на масата, според който количеството газ, което влиза в дадена система, трябва да бъде равно на количеството газ, което излиза от нея, като се отчита и промяната на количеството газ в тръбопровода.

Основната формула може да бъде представена по следния начин:

$$Q_{in} - Q_{out} - \Delta S = L \quad (1)$$

където:

Q_{in} – входящ дебит на газа

Q_{out} – изходящ дебит на газа

ΔS – промяна в количеството газ, съхранявано в тръбопровода

L – загуба на газ, която може да бъде индикатор за теч.

Този метод позволява откриването на аномалии в работата на тръбопроводната система чрез непрекъснато наблюдение на параметри като дебит, налягане и температура. Данните се събират чрез измервателни устройства и се обработват от системи за управление и мониторинг.

Акустични методи за откриване на течове

Акустичните системи за детекция на течове се основават на регистрирането на звуковите вълни, които се генерират при изтичане на газ от тръбопровода. При възникване на теч се създават характерни акустични сигнали, които могат да бъдат засечени от специализирани сензори.

Тези системи позволяват бързо откриване на течове и сравнително точно определяне на тяхното местоположение, което ги прави подходящи за използване в дълги тръбопроводни системи.

Наблюдение чрез оптични влакна

Технологиите за наблюдение чрез оптични влакна представляват модерно решение за непрекъснат мониторинг на тръбопроводи. Оптичният кабел се инсталира по протежение на тръбопровода и функционира като разпределен сензор, който може да регистрира промени в температурата, вибрациите и акустичните сигнали.

Този метод позволява наблюдение на цялата дължина на тръбопровода и осигурява висока точност при локализиране на течове.

Вътрешни инспекционни устройства

Друг важен метод за мониторинг на тръбопроводни системи е използването на вътрешни инспекционни устройства като Smart Pig. Тези устройства се движат вътре в тръбопровода и събират информация за неговото техническо състояние.

С помощта на различни сензорни технологии те могат да откриват корозия, пукнатини, деформации и други структурни дефекти, които могат да доведат до бъдещи течове.

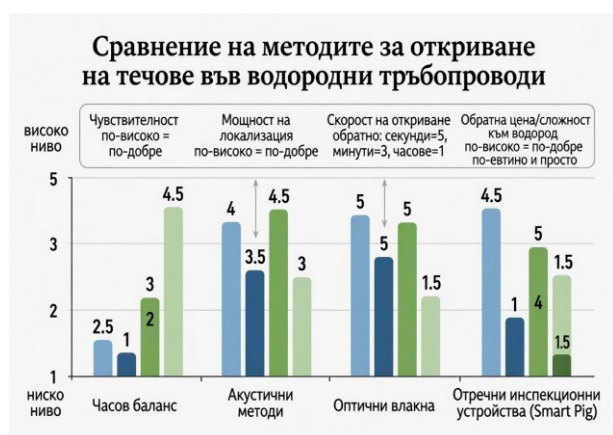
Събраните данни от различните методи могат да бъдат интегрирани в централизирани системи за управление и мониторинг като SCADA, което позволява наблюдение в реално време и по-бърза реакция при възникване на аномалии.

Анализ и сравнение на технологиите

В този раздел се извършва сравнителен анализ на описаните в Методологията методи за откриване на течове във водородни тръбопроводи. Сравнението се базира на ключови показатели за ефективност, които са особено важни за водородните системи:

- Чувствителност (минимален откриваем размер на теча, обикновено в % от номинални дебит).
- Точност на локализация (разстояние в метри).
- Време за откриване (от момента на възникване на теча до аларма).
- Приложимост към водород (отчитане на ниската плътност, високата дифузия, липсата на цвят/мирис и Joule-Thomson охлаждане при изтичане).
- Податливост към фалшиви аларми.
- Цена и сложност на инсталация/поддръжка.
- Възможност за интеграция в SCADA системи.

Водородът представлява специфично предизвикателство в сравнение с природния газ, тъй като молекулата му е значително по-малка, което води до по-висока скорост на изтичане през малки дефекти, по-голяма проникваемост през уплътнения и по-бързо разсейване в атмосферата. Това изисква методи с висока чувствителност към малки течове (под 1–0.5 %) и бърза реакция.



Фиг. 1. Сравнение на основните методи за откриване на течове във водородни тръбопроводи.

Стойностите са ориентировъчни и зависят от конкретната конфигурация, дължина на тръбопровода, налягане и използване на AI/модели за подобряване.

Специфики при водородни тръбопроводи.

Масов баланс: При водород методът е по-малко ефективен в сравнение с природен газ поради по-ниската плътност и по-високата компресируемост. Транзиентните режими (промени в дебита) генерират по-големи отклонения в ΔS , което повишава фалшивите аларми. Подобряване се постига чрез Extended Real-Time Transient Modeling (E-RTTM) с pattern recognition.

Акустични методи: Водородът при високо налягане генерира силни турбулентни шумове при изтичане, което улеснява откриването. Въпреки това, бързото разсейване в атмосферата може да намали продължителността на сигнала.

Оптични влакна: Това е една от най-перспективните технологии за водород – Distributed Acoustic Sensing (DAS) открива дори малки течове (под 0.1 %) с точност под 10 m, а Distributed Temperature Sensing (DTS) улавя Joule-Thomson охлаждането при изтичане на H_2 . Съвременните системи с машинно обучение значително намаляват фалшивите аларми. Smart Pig: Полезен за превантивен контрол (откриване на водородно индуцирано крехкост/пукнатини), но не замества реално-времевия мониторинг.

Интеграция и хибридни подходи

Най-ефективни са хибридните системи, комбиниращи няколко метода (напр. масов баланс за груб скрининг + DAS за точна локализация + периодични Smart Pig инспекции). Това повишава надеждността, намалява фалшивите аларми и отговаря на строгите изисквания за безопасност при транспортиране на водород.

Резултати и обсъждане

От проведения сравнителен анализ ясно се открояват съществени разлики в ефективността на отделните методи при специфичните условия на водородните тръбопроводи. Както се вижда от колонната диаграма по-горе, оптичните влакна (DAS/DTS) се налагат като най-перспективното решение за непрекъснат мониторинг. Те постигат най-високи стойности по всички ключови показатели – чувствителност под 0,1 %, точност на локализация до 1–10 m и време за реакция от секунди. Това ги прави особено подходящи за новостроящи се водородни магистрали (като European Hydrogen Backbone), където могат да се инсталират още при полагането на тръбопровода. Акустичните методи предлагат отлична алтернатива за съществуващи тръбопроводи, където ретроспективното полагане на оптични кабели е трудно или скъпо. Те осигуряват бързо откриване (секунди) и добра локализация, но страдат от по-висока чувствителност към външен шум, което налага използването на съвременни алгоритми с машинно обучение за филтриране на фалшиви аларми. Методът на масовия баланс остава най-достъпният и евтин вариант, но е недостатъчно чувствителен за малки течове на водород (под 1 %). При водород той е особено уязвим поради високата компресируемост и бързите транзиентни процеси, което води до чести фалшиви аларми. Поради това е препоръчително да се използва само като първи слой в хибридни системи (за груб скрининг). Вътрешните инспекционни устройства (Smart Pig) не са подходящи за реално-времево откриване, но са незаменими за превантивен контрол. Те откриват корозия, водородно-индуцирана крехкост и микропукнатини преди да се превърнат в теч. Идеалното приложение е периодична инспекция (веднъж на 1–3 години) в комбинация с непрекъснат мониторинг.

Общият извод е, че нито един метод самостоятелно не осигурява 100 % надеждност. Най-висока безопасност и минимален риск от неконтролирани емисии на водород се постига при хибридни системи: Масов баланс + акустични сензори за бърза аларма. Оптични влакна за точна локализация и непрекъснат контрол. Периодични Smart Pig инспекции за превантивна поддръжка.

Такава комбинация намалява фалшивите аларми с над 70 % (според данни от пилотни проекти в Германия и САЩ) и отговаря на изискванията на стандарти като ASME B31.12 и EU Regulation on Hydrogen Pipelines.

От гледна точка на приложимост в България, където се планира изграждането на национална водородна мрежа до 2030 г., приоритет трябва да се даде на оптичните технологии при новите трасета, а при съществуващите газопроводи (които ще се конвертират) – на акустични + масов баланс.

Заклучение

Настоящото изследване предоставя систематичен преглед и сравнителен анализ на основните технологии за откриване на течове във водородни тръбопроводни системи. От проведените анализ става ясно, че водородът, поради своите уникални физико-химични свойства (висока дифузия, ниска плътност, липса на цвят и мирис, както и Joule-Thomson ефект при изтичане), изисква почувствителни, бързи и точни методи за детекция в сравнение с традиционните природен газ. Най-ефективни се оказват оптичните влакна с разпределено акустично и температурно сензиране (DAS/DTS), които постигат висока чувствителност (под 0,1 %), прецизна локализация (1–10 m) и време за реакция от секунди, като същевременно покриват цялата дължина на тръбопровода. Тези технологии са особено подходящи за новите водородни мрежи и се препоръчват като основен метод за непрекъснат мониторинг. Акустичните методи остават добра алтернатива за съществуващи инфраструктури, предлагащи бърза детекция и приемлива локализация, макар и с по-висок риск от фалшиви аларми поради външен шум. Методът на масовия баланс е икономичен и лесен за внедряване, но недостатъчно чувствителен за малки течове на водород и трябва да се използва само като допълнителен слой в хибридни системи. Вътрешните инспекционни устройства (Smart Pig) са критични за превантивна диагностика и откриване на структурни дефекти (корозия, водородно-индуцирана крехкост), но не заместват реално-времевия мониторинг. Ключов извод е, че оптималната безопасност се постига чрез хибридни подходи, комбиниращи няколко метода с интеграция в системи за управление като SCADA и използване на AI за намаляване на фалшивите аларми. Това отговаря на изискванията на международни стандарти (ASME B31.12, EU регулации за водородни инфраструктури) и минимизира рисковете от емисии, пожари и експлозии.

За България, в контекста на националната водородна стратегия и интеграцията в European Hydrogen Backbone, препоръчително е: При новите тръбопроводи – приоритет на оптични влакна; При конвертиране на съществуващи газопроводи – акустични методи + подобрен масов баланс;

Задължителни периодични инспекции с вътрешни устройства; Инвестиции в обучение, AI-базирани системи и пилотни проекти за валидация.

Бъдещите изследвания трябва да се фокусират върху: Разработване на AI/ML модели за по-точна обработка на данни от хибридни системи; Тестване на методите при

реални условия с високи концентрации на водород (над 50 % в H₂NG смеси); Оценка на дългосрочната надеждност и икономическа ефективност при мащабни мрежи.

С успешното внедряване на тези технологии водородът може да се превърне в безопасен и надежден енергиен носител за декарбонизацията на икономиката.

Литература

- БДС 14397-89 – Техника на безопасността съдове, работещи под налягане основни изисквания към конструкцията.
- БДС 12961-83 Техника на безопасността съдове, работещи под налягане. Изисквания към предпазните клапан.
- БДС 10271-78 Техника на безопасността. Съдове работещи под налягане. Изисквания към бутилките за транспортиране на сгъстени, втечнени и разтворени под налягане газове.
- БДС 9222-82 Вентили за бутилки за втечнени въглеводородни газове с вместимост от 5 до 80 dm³ 10. БДС EN1442 +AC Транспортируеми заварени стоманени бутилки за втечен въглеродороден газ (LPG) за многократно проектиране и производство.
- Закон за техническите изисквания към продуктите, обн. ДВ. бр. 86 от 1 Октомври 1999 г. изм. ДВ. бр. 66 от 26 Юли 2013 г., изм. ДВ. бр. 68 от 2 август 2013 г. 2. Наредба за устройството, безопасната експлоатация и техническия надзор на газовите съоръжения и инсталации за втечнени въглеводородни газове В сила от 23.10.2004 г. Приета с ПМС № 243 от 10.09.2004 г. Обн. ДВ. бр. 82 от 21 Септември 2004 г., изм. ДВ. бр. 24 от 12 Март 2013 г.
- Наредба за устройството, безопасната експлоатация и техническия надзор на съоръжения под налягане, в сила от 19.08.2008 г. Приета с ПМС № 164 от 07.07.2008 г. Обн. ДВ. бр. 64 от 18 Юли 2008 г., изм. ДВ. бр. 24 от 12 Март 2013 г. 4. БДС 8544-88 Бутилките стоманени за втечнени въглеводородни газове с вместимост от 0,85 до 5,00 dm³. 5. БДС 14399-89 – Техника на безопасността съдове, работещи под налягане изисквания към измервателните уреди.
- Hydrogen can be produced by various process technologies. <https://www.entsog.eu/hydrogen>
- Hydrogen Infrastructure Map <https://www.h2inframap.eu/>
- Oil & Gas Journal, International Petroleum News and Technology. <https://www.ogj.com/>
- Pipeline & Gas Journal, International Pipeline & Gas Utility Operations, Design & Maintenance. <https://pgjonline.com/>